HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	砂の繰返し載荷試験結果に及ぼす諸因子の影響と試験結果の適用に関する研究
Author(s)	山下, 聡
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第4269号
Issue Date	1993-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3093000
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49900
Type	doctoral thesis
File Information	000000265463.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

砂の繰返し載荷試験結果に及ぼす諸因子の影響と試験結果の適用に関する研究

1992年10月

山下　聡

(1)

砂の繰返し載荷試験結果に及ぼす諸因子の影響と試験結果の適用に関する研究

１９９２年１０月

山　下　　聡

目　次

第１章　序　論
1.1　研究の背景 ---- 1
1.2　研究の目的 ---- 3
1.3　本論文の構成 ---- 5
1.4　既往の研究 ---- 7
1.4.1　液状化試験に及ぼす諸因子 ---- 7
1）　供試体作製方法の影響 ---- 7
2）　応力履歴の影響 ---- 10
3）　試験方法の影響 ---- 11
1.4.2　繰返し変形試験に及ぼす諸因子 ---- 12
1）　供試体作製方法の影響 ---- 12
2）　応力履歴の影響 ---- 13
3）　試験方法の影響 ---- 13

第２章　試料および試験方法
2.1　概　説 ---- 16
2.2　試　料 ---- 17
2.2.1　不攪乱試料の採取 ---- 17
2.2.2　再構成試料 ---- 19
2.2.3　試料の物理的性質 ---- 19
2.3　供試体作製方法 ---- 21
2.3.1　ＭＳＰ法 ---- 21
2.3.2　Ｓ－ＭＳＰ法 ---- 21
2.3.3　ＶＩＢ法 ---- 22
2.3.4　ＣＥ法 ---- 22
2.4　試験装置 ---- 30
2.4.1　三軸試験装置 ---- 30
2.4.2　中空ねじり試験装置 ---- 30
2.5　試験方法 ---- 33
2.5.1　圧密方法 ---- 33
1）　過圧密履歴 ---- 33
2）　異方圧密履歴 ---- 36
2.5.2　液状化試験 ---- 39
2.5.3　繰返し変形試験 ---- 43

第３章　液状化強度特性に影響を及ぼす諸因子 ---- 45
3.1　概　説 ---- 45
3.2　供試体作製法の影響 ---- 46

3.2.1 三軸試験 ---- 47
1） 供試体の切り出し方向の影響 ---- 47
2） 液状化強度に及ぼす凍結の影響 ---- 50
3） 供試体作製方法の影響 ---- 55
3.2.2 中空ねじり試験 ---- 59
3.3 過圧密履歴の影響 ---- 62
3.3.1 原位置で受けた過圧密履歴の影響 ---- 62
3.3.2 室内で与えた過圧密履歴の影響 ---- 66
3.3.3 再構成砂における過圧密履歴の影響 ---- 70
3.3.4 三軸試験と中空ねじり試験による比較 ---- 73
3.4 異方圧密履歴の影響 ---- 75
3.4.1 異方圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響 ---- 76
3.4.2 液状化強度に及ぼす異方圧密時の最大圧密圧力の影響 ---- 79
3.4.3 圧密経路の相違による液状化強度の変化 ---- 82
3.4.4 液状化強度に及ぼす異方圧密履歴の影響の定量的評価 ---- 86
3.4.5 初期構造の異なる供試体における比較 ---- 88
3.4.6 中空ねじり試験による比較 ---- 98
3.5 初期応力状態の影響 ---- 101
3.6 三軸試験と中空ねじり試験の比較 ---- 105
3.6.1 三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較 ---- 105
1） 不攪乱供試体での比較 ---- 105
2） 再構成供試体での比較 ---- 106
3.6.2 供試体形状の影響 ---- 118
3.7 液状化判定方法への適用性の検討 ---- 122
3.8 本章のまとめ ---- 128

第４章 繰返し変形特性に及ぼす諸因子
4.1 概 説 ---- 132
4.2 供試体作製法の影響 ---- 134
4.2.1 三軸試験 ---- 137
4.2.2 中空ねじり試験 ---- 144
4.3 応力履歴の影響 ---- 151
4.3.1 過圧密履歴の影響 ---- 151
4.3.2 異方圧密履歴の影響 ---- 155
1） 三軸試験 ---- 157
2） 中空ねじり試験 ---- 163
4.3.3 繰返し履歴の影響 ---- 165
4.4 初期応力状態の影響 ---- 168
4.5 繰返し載荷方法の影響 ---- 173
4.5.1 載荷回数の影響 ---- 173

4.5.2 排水条件の影響 ---------- 179
4.5.3 ステージ数の影響 ---------- 182
4.5.4 載荷波形の影響 ---------- 188
4.6 三軸試験と中空ねじり試験による比較 ---------- 190
4.6.1 Geqに及ぼす試験方法の影響 ---------- 190
4.6.2 hに及ぼす試験方法の影響 ---------- 202
4.6.3 正規化Geqに及ぼす試験方法の影響 ---------- 204
4.7 単調載荷試験と繰返し載荷試験の比較 ---------- 211
4.8 試験結果の適用性の検討 ---------- 220
4.8.1 排水条件の影響 ---------- 220
4.8.2 三軸試験と中空ねじり試験の定量的比較 ---------- 225
4.8.3 せん断剛性率と液状化強度の関係 ---------- 227
4.9 本章のまとめ ---------- 231

第5章 結 論 ---------- 234

参考文献 ---------- 237

謝 辞 ---------- 244

第１章　序　　論

１．１　研究の背景

静的な問題として土を取り扱う場合、構造物の基礎や土構造物が破壊に対してどの程度安全であるかを明らかにすることが、従来の土質力学における関心の的であった。具体的には、土の強度からすべりに対して安全であるか、または、変形（圧密沈下）に対して安全であるかを調べることが対象であった。それに対して地盤内を伝播する波動や地震時における土構造物の振動、地盤の液状化現象等が対象となる動的問題においては、土の破壊以前の変形特性や、静的な破壊応力に比べ遙かに小さな応力が繰返し加えられたときの強度特性が主要な問題となる。

動的強度特性における主要な関心は砂地盤の液状化現象である。砂地盤が地震時に繰返し応力を受けると、液体のような状態を呈し甚大な被害を生じる。地震による液状化現象が注目を集めたのは、1964年に相次いで起こったアラスカ地震および新潟地震である。アラスカ地震では大規模な地すべりが発生し、新潟地震では落橋、構造物の倒壊等が発生した。この時以来、主として日本および米国において地震時の液状化現象に関する研究が活発となった。

1966年Seedら（1966）は、地震時における液状化現象は、砂地盤が非排水条件の下でせん断応力を受けるものとし、繰返し三軸試験により地震時の液状化特性の研究を始めた。Seedは、自動車の走行による繰返し荷重を受けた土の変形を研究する目的で三軸試験装置を考案し、後に開発した繰返し三軸試験装置が土の耐震強度と変形特性を研究する動的試験装置に発展する原型ともいうべきものとなった。その後、実際の地盤の応力状態に対応した状態で試験を行うための単純せん断試験装置や中空ねじり試験装置等が開発され、より的確な地盤の液状化特性を解明しようとする研究が進められている。

一方、動的変形特性に関しては、地盤はその形成の歴史によって、構造、密度、組成が場所によって多様に変化しているため、同一の地震であっても、それほど離れていない地点できわめて異なった被害や地震動記録が得られる。したがって、地盤を形成する土の動的特性が如何なる要因によって変化するかを

知る必要がある。

例えば、ひずみレベルに注目すると、静的問題においては、対象とするひずみは土の破壊で数パーセント以上のひずみが発生している状態であり、圧密沈下で工学上問題となる変形も10^{-3}以上のひずみレベルである。それに対して地盤の常時微動、小規模な地震動や交通荷重による波動が伝播するときのひずみレベルは静的問題で考えるよりは遙かに小さい10^{-6}程度のひずみレベルであり、中規模な地震や杭振動等は10^{-4}前後のひずみレベルである。また、地震応答解析を行うためには微小なひずみレベルから大ひずみレベルまでの変形特性のひずみ依存性を正確に知る必要がある。

原位置試験から地盤の動的変形特性を求める場合には弾性波探査試験等が用いれるが、得られる変形特性は10^{-6}前後のひずみレベルでの値である。それに対して室内試験から動的変形特性を求める装置は、微小なひずみレベルでは飯田らによって先駆的に開発された共振法土質試験である。しかし、この試験装置から得られるひずみレベルは10^{-6}～10^{-4}の範囲である。さらに大きなひずみレベルでの変形特性は先に述べた動的試験装置によって求められている。また、国生（1980）は三軸試験装置を改良し微小なひずみレベルから動的変形特性を求める試験装置を開発している。このように、試験装置によって得られるひずみレベルが異なるため、各種室内試験結果の間で、原位置試験と室内試験結果の間で不一致が見られる。また、試験基準が策定されていないため、機関によって試験方法が異なり、異なる試験機関での比較ができない場合がある。さらに、試験結果に及ぼす各種影響因子が定量的に評価されておらず、どのような点に注意を払って試験を行い結果を整理すべきなのか明らかにされていない面が多い。したがって、原位置での変形強度特性を正確に評価するためには、これらの試験結果に及ぼす要因とその影響の程度を定量的に明らかにする必要がある。

１．２　研究の目的

室内試験の重要な目的の一つは、設計に必要な原地盤の信頼おける変形・強度定数を求めることである。そのためには、試験結果に及ぼす各種要因およびその影響の程度が正確に評価されていなければならない。そこで、本研究では、室内試験から砂の繰返し載荷による変形－強度特性を求め、試験結果に及ぼす各種影響因子を定量的に評価し、地盤の液状化判定のための試験結果の適用性を図ることを主な目的とする。

室内試験から地盤の液状化強度特性や繰返し変形特性を求める場合、繰返し三軸試験装置が広く用いられている。しかし、繰返し載荷を受けたときの土要素の応力状態は地震時におけるそれと異なっている。表１－１には安田（1988）が各種室内試験装置と原位置での応力状態の比較およびそれらの特徴をまとめたものである。三軸試験装置に対しねじり試験装置や単純せん断試験装置の方がより原位置の応力状態に対応した試験装置であることが分かる。しかし、単純せん断試験においても境界応力が不均一であるなどの問題もある。また、三軸試験装置は試験装置の取扱い易さ、不攪乱試料の成形のし易さ、試験装置の普及度から、今後も広く研究および実務において用いられる試験装置であると考えられる。したがって、各種試験装置から得られた試験結果の相互関係や試験結果に及ぼす要因を的確に評価することによって三軸試験装置の価値も高まると考えられる。そこで、以下の項目について研究する。

（１）異なる試験装置による試験結果の比較

広く国内で普及している三軸試験装置と原位置での応力状態をより的確に再現できる中空ねじり試験装置によって砂の繰返し載荷による変形強度特性を求め、試験結果を比較する。

（２）供試体作製方法が試験結果に及ぼす影響

原位置から採取した不攪乱試料を用いて三軸試験を行う場合、通常地盤に対して鉛直方向から採取した試料を用いる。周知のように地盤は異方的な構造特性を有しているため、繰返し載荷の方向と堆積面との関係が異なることによって得られる結果が異なることが考えられる。そこで、室内で再構成した構造の異なる数種の供試体を用いて試験結果を比較する。

（３）応力履歴の影響

原位置では、その堆積条件や地下水位の変動等により種々の応力履歴を受けていると考えられる。そこで、供試体に過圧密履歴および異方圧密履歴を与え試験結果に及ぼす影響を調べる。また、その影響は不撹乱試料と再構成試料との間で相違はないのか、試験装置によって影響程度は異なるかを調べる。

（４）試験方法の影響

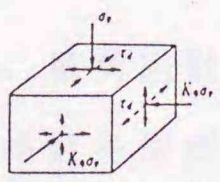
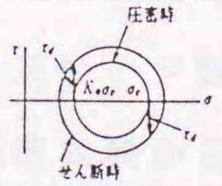
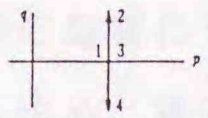
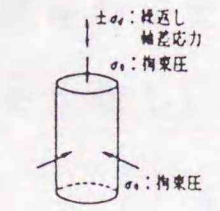
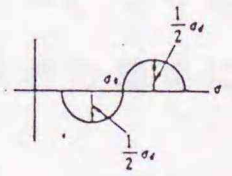
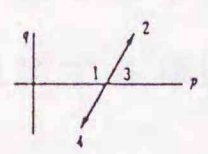
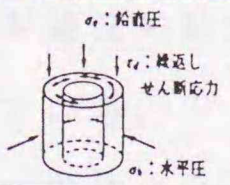
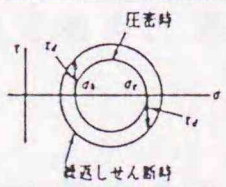
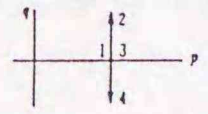
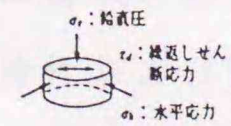
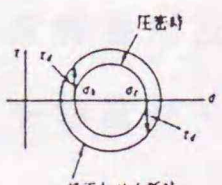
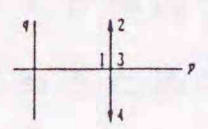
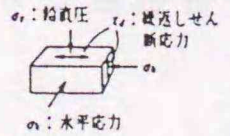
室内試験特有の問題である、供試体の寸法やメンブレンペネトレイションの影響、繰返し変形試験を行う際の排水条件、載荷回数等の載荷方法が結果に及ぼす影響を調べる。また、単調載荷試験と繰返し載荷試験による変形係数とを比較する。

（５）液状化強度と繰返し変形特性の比較

同じ試料を用いた試験結果によると、液状化強度とせん断剛性率はユニークな関係にあるとされているが、上記の影響因子を考慮した場合その関係がどのように変化するかを調べる。

以上の試験結果から、各種因子を定量的に評価し、現状の試験方法や液状化判定法に対する適用性を提言する。

表１－１ 室内液状化試験装置の種類と特徴（安田，1988）

種類＼項目	応力状態	モール円	応力経路（全応力）1→2→3→4	拘束状態	ひずみ状態	繰返し荷重
原地盤				異方応力状態（K_0圧密）（初期せん断応力が加わることもある）	平面ひずみ 単純せん断変形	多方向ランダム波
繰返し三軸（別名 振動三軸 動的三軸）				等方応力状態	軸対称変形	一方向正弦波
繰返しねじりせん断（別名 動的ねじりせん断）（リングねじりせん断も同種類）				等方または異方応力状態（K_0圧密可）（初期せん断応力も加えられる）	平面ひずみ 単純せん断変形	一方向 正弦波またはランダム波
繰返し単純せん断 NGI型				異方応力状態（準 K_0圧密；K_0未知）（初期せん断応力も可）	平面ひずみ 単純せん断変形	多方向 正弦波またはランダム波
繰返し単純せん断 Cambridge型				異方応力状態（K_0圧密）（初期せん断応力も可）	平面ひずみ 単純せん断変形	一方向 正弦波またはランダム波

１．３　本論文の構成

本論文は、表１－２および以下に示すように５章より構成されている。

第１章では本研究の背景および目的について述べるとともに、本研究に関連の深い、室内液状化試験結果および動的変形試験結果に及ぼす各種影響因子に関する在来の研究をまとめている。

第２章では、本研究で用いた試料および不攪乱試料の採取方法、本研究の主たる研究テーマの１つである供試体の異方性が試験結果に及ぼす影響を調べるために用いた供試体作製方法について述べている。また、微小なひずみレベルから大ひずみレベルまで１つの装置で試験を行うために改良した試験装置の概要および試験方法について示している。

第３章では、液状化試験結果に及ぼす諸因子の影響について、その定量的評価と試験結果の液状化判定への適用性について検討している。具体的には、供試体作製方法、過圧密履歴および異方圧密履歴の影響について検討するとともに、三軸試験とねじり試験から得られた液状化強度の比較を行い、通常の液状化判定に用いられている三軸試験結果から、実際の地盤内における応力条件を考慮した液状化強度の推定方法を示している。

第４章では、第３章の液状化強度特性に及ぼす影響因子が、動的変形特性に対してはどのような影響を及ぼすか、また、影響の仕方はどのように異なるかを示している。また、動的変形試験を行う際に特有な問題である、繰返し載荷時の排水条件、載荷回数、ステージ数等の影響についても示している。

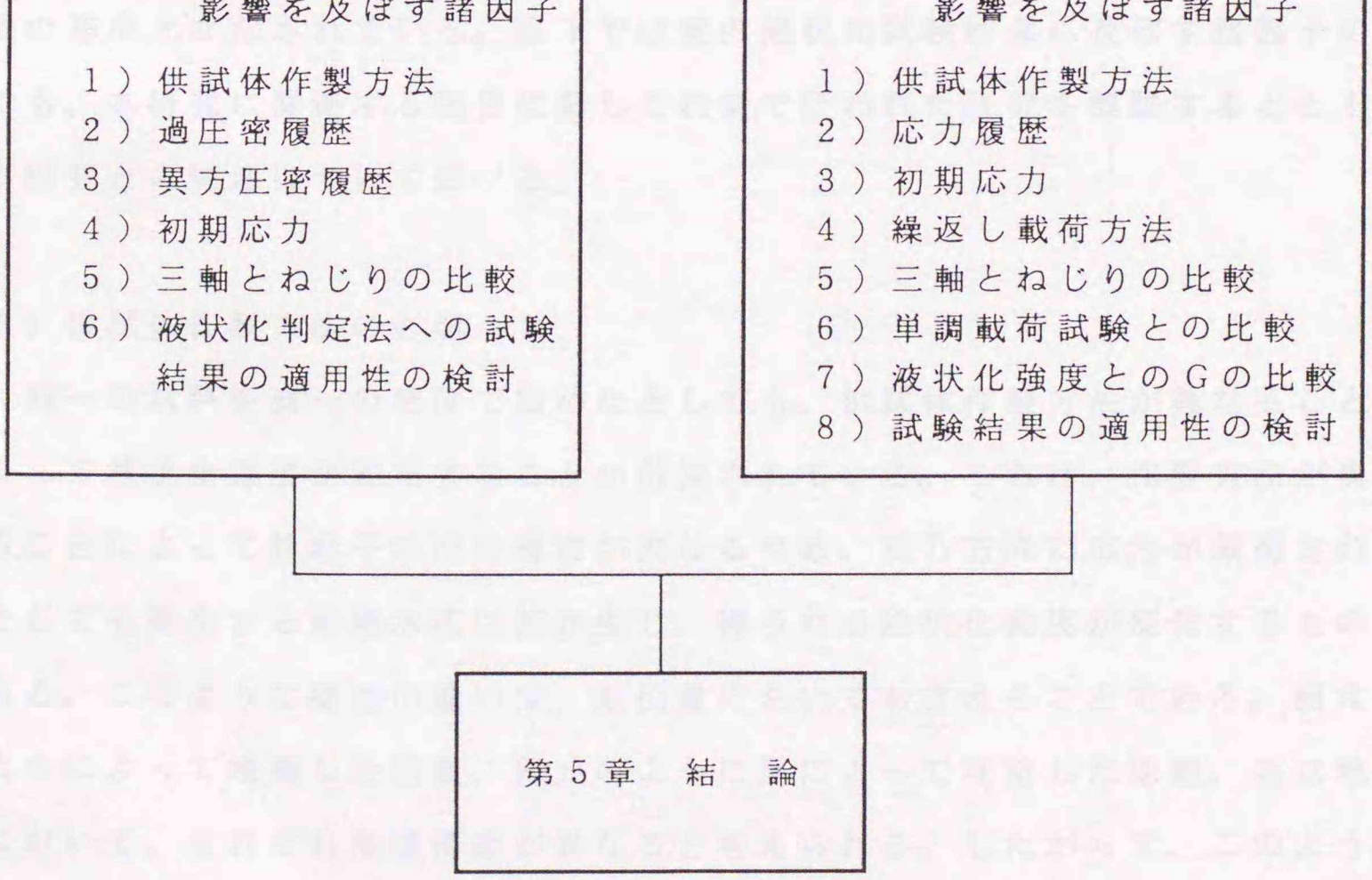
また、変形係数を単調載荷試験からも求め、繰返し載荷試験から得られた変形特性との比較を行っている。さらに、第３章で得られた液状化強度とせん断剛性率の関係を比較し、両者の関係に及ぼす各種因子の影響についても検討している。

第５章は、本論文の結論であり、各章で得られた結果を要約し、今後の課題について述べている。

以上のように構成された本論文より、広範なひずみ領域での砂の繰返し載荷に対する変形特性および強度特性に及ぼす各種因子の影響を定量的に評価し、地盤の変形および強度特性を精度良く求めるための室内試験方法に対して重要

な知見を与えている。また、現在基準化されていない繰返し変形試験方法の確立のための有用な提言を行うとともに、三軸試験による在来よりも信頼性の高い液状化強度の評価方法を示している。

表１－２　本論文の構成



１．４　既往の研究

１．４．１　液状化試験に及ぼす諸因子

砂地盤の液状化強度を評価する室内試験として、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して軸対称条件で鉛直方向に繰返し応力を加えるため、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状態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。また、繰返し載荷時において供試体は軸方向に繰返し応力を受けるため、地震時における地盤内の応力変形条件を再現していない。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。実務的立場ばかりでなく、土質動力学の分野においてさら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。このような背景のもとで米国と日本において、ここ２０年余りの間に精力的な研究が行われ、日本においては土質工学会が中心となって、過去数度の国内一斉試験が行われ、試験結果に及ぼす各種要因の影響がある程度明らかにされ試験方法の基準化がなされている。以下では室内液状化試験結果に及ぼす諸因子の中でも、本研究に関連する項目に関しこれまで行われた研究を概説するとともに本研究との関連について述べる。

１）供試体作製方法の影響

同一の試料を同一の密度で詰めたとしても、供試体作製方法が異なることによって液状化強度が変化することが指摘されている。これは、作製方法が異なることによって砂粒子の配列構造が異なるため、同じ方向に応力が載荷されたとしても発生する間隙水圧に差が生じ、得られる液状化強度が変化するものである。このような構造の違いは、原位置においても言えることである。例えば流水によって堆積した地盤、砂丘のように風によって堆積した地盤、埋立地盤において、それぞれ堆積構造が異なると考えられる。したがって、このような

地盤では同じ密度であっても液状化強度は異なることが考えられる。また、原位置から採取した不撹乱試料を用いて試験を行う場合、供試体は鉛直方向から採取した試料が一般に用いられる。したがって、供試体を採取する方向によっても得られる液状化強度が異なることが考えられる。

供試体作製方法が液状化強度に及ぼす影響に関して、Mulilisら(1977) は図１－１に示すように、１３種類の方法によって作製した供試体を用いて繰返し三軸試験を行い、液状化強度特性に及ぼす影響を調べている。その影響は顕著に認められ、供試体作製法によっては２倍以上も液状化強度が異なっている。また、Silverら（1980）は突き固めと空中落下によって作製した供試体を用いて三軸試験とＮＧＩ型単純せん断試験を行い、図１－２に示すように単純せん断試験では差は認められなかったが三軸試験では液状化強度が変化することを示した。さらに、龍岡ら（1986）は数種の試料を用いて４種類の方法で作製した供試体に対して三軸試験と中空ねじり試験を行い、供試体の作製方法は両試験結果に大きな影響を及ぼすことを示した（図１－３）。ただし、その影響の仕方は試験方法によって異なることも指摘している。

このように、供試体の作製方法によって得られる液状化強度は異なるとともに、その影響の仕方も試験方法によって異なることが分かっている。しかし、その影響の程度は定量的には評価されていない。また、現状の液状化判定においても考慮されていない。

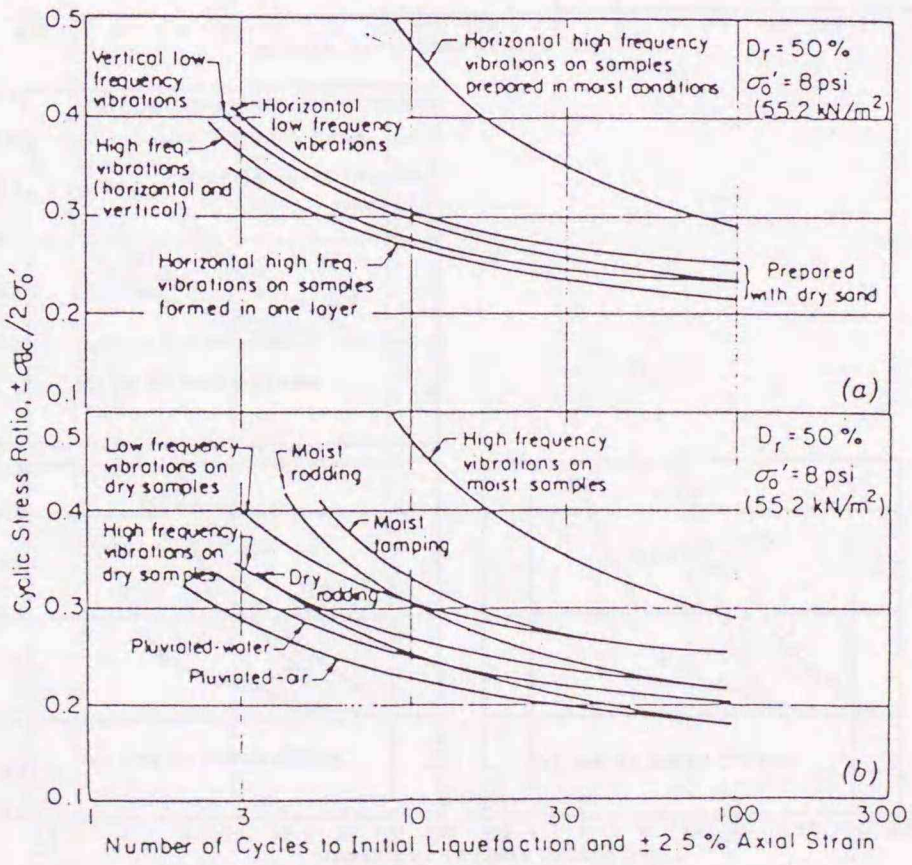


図１－１　供試体作製方法が液状化強度に及ぼす影響（Mulilisら，1977）

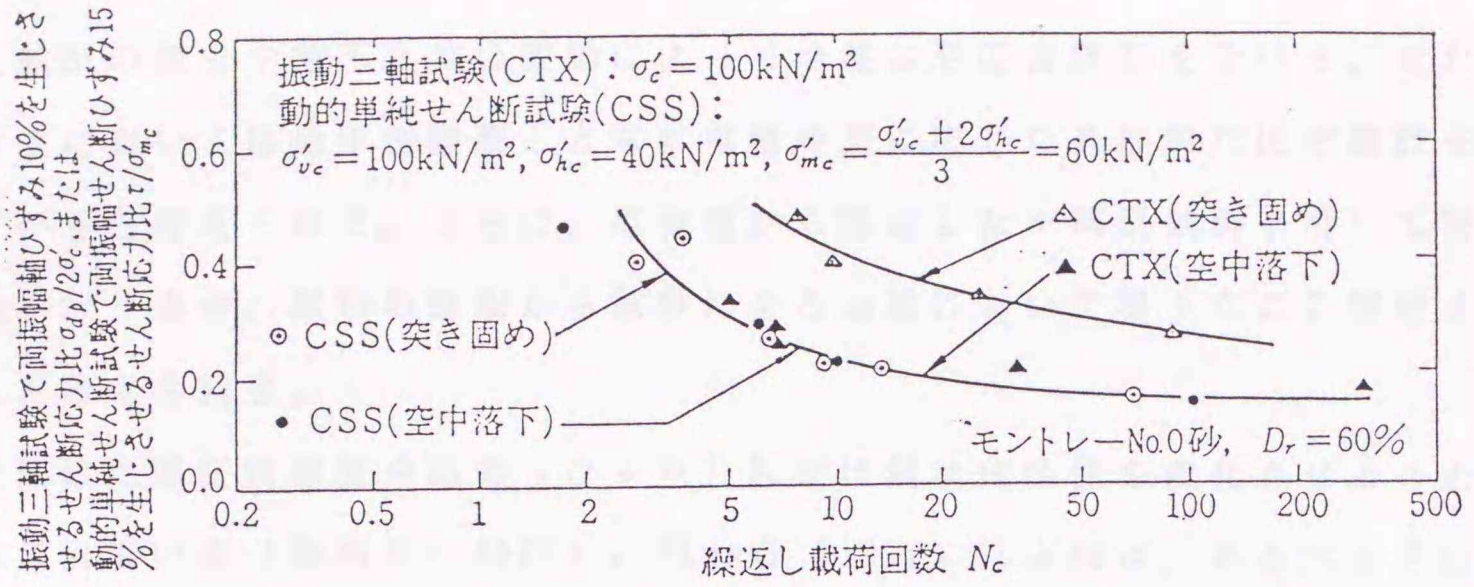


図１－２　三軸試験と単純せん断試験での供試体作製方法が液状化強度に及ぼす影響（Silverら，1980，文献56から引用）

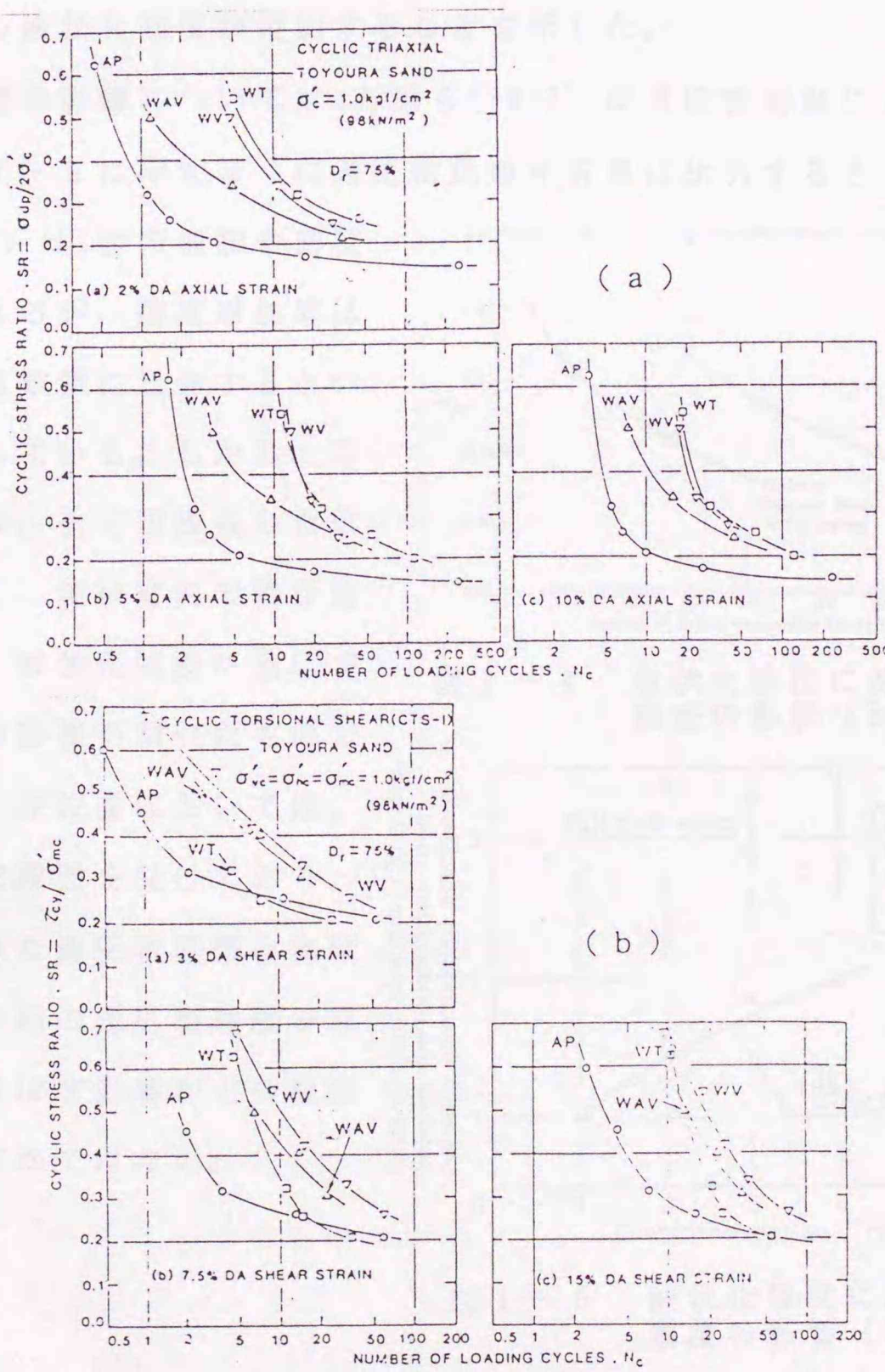


図１－３　供試体作製方法が液状化強度に及ぼす影響
(a)三軸試験　(b)中空ねじり試験（龍岡ら，1986）

２）応力履歴の影響

上載圧の除去や地下水位の変動によって地盤は過圧密履歴を受ける。また、原位置においては過圧密履歴とともに堆積時間に応じた長期的な圧密履歴を受けていると考えられる。さらに、原位置から採取した不撹乱試料を用いて室内試験を行う場合、試料の採取から試験に至る過程において様々な応力履歴を受けると考えられる。

供試体に過圧密履歴や応力（ひずみ）履歴は液状化特性を変化させることが認められている（鈴木ら，1985）。Finnら（1970）によれば、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ている。また、Seedら（1977）は、図１－４に示すように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。

過圧密履歴の影響については、石原ら（1979）は過圧密履歴による液状化強度の増加は図１－５に示すように過圧密比の平方根に比例するとしている。また、龍岡ら（1988）は、砂の種類や密度によって異なるが、強度増加率は過圧密比の指数乗に比例するという結果を示している。しかし、これらの結果は、全て再構成した供試体に対して、実験室内で過圧密履歴を与え、液状化強度に及ぼす過圧密履歴の影響を調べたものである。一方、原位置においては、長期的な圧密履歴を受けており、原位置で受けた過圧密履歴と実験室内での短時間の過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響がどの程度異なるかは確かではない。

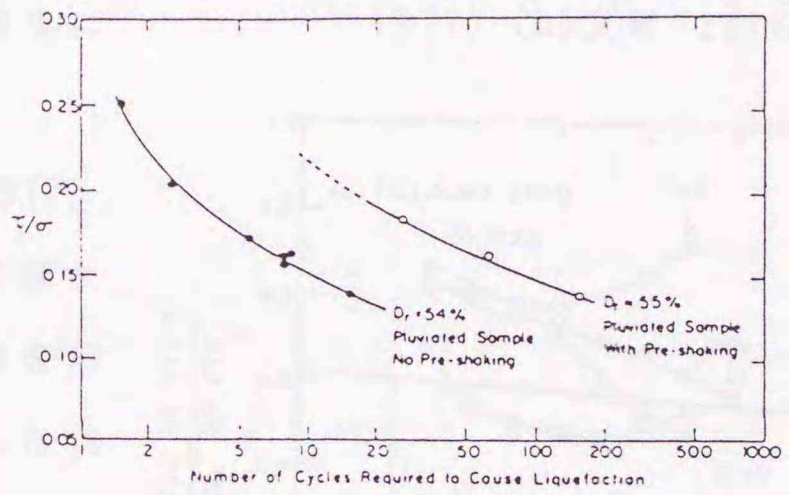


図１－４　液状化強度に及ぼす応力履歴の影響（Seedら，1977）

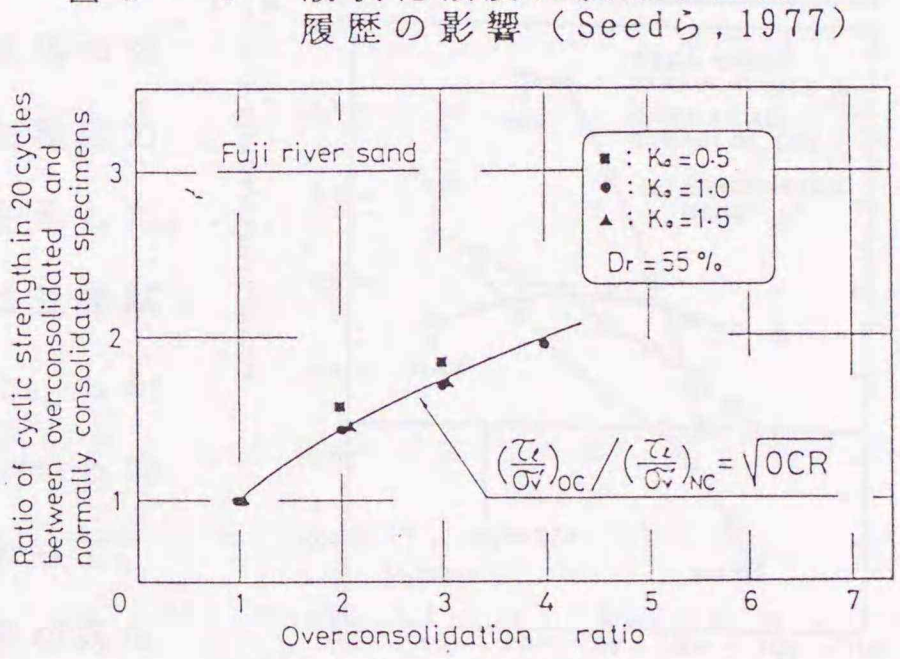


図１－５　液状化強度に及ぼす過圧密履歴の影響（石原ら，1979）

３）試験方法の影響

先に述べたように地盤の液状化特性を評価する試験として、繰返し三軸試験が国内外を問わず広く用いられている。しかし、この試験は三軸圧縮および伸張応力条件のみによって液状化特性を評価しており、実際の地震時における地盤内の応力状態を再現しているものではない。また、原位置において土要素は鉛直方向と水平方向の応力状態が異なる異方圧密状態にあるのに対し、三軸試験は等方圧密した供試体に対して行われる。したがって、試験時の初期応力状態や繰返し載荷時の応力状態が試験結果に及ぼす影響を調べる必要がある。

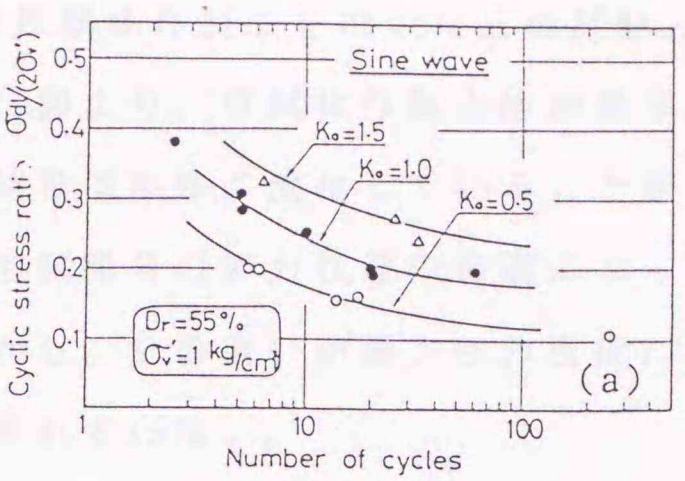


図１－６　初期応力の影響(a)石原ら，1977）(b)文献73から引用

初期応力に関して、石原ら（1975,1977,1979）はゆる詰めの富士川砂を用いて種々の圧密応力比のもとで中空ねじり試験を行い、図１－６に示すように異方圧密した供試体の液状化強度は試験時の平均主応力で正規化した場合、等方圧密した供試体の液状化強度に等しくなることから、初期応力に関する補正係数 $c_1=(1+2K)/3$ を示した。また、中空ねじり試験による結果は三軸試験結果とも等しくなることも示した。しかし、図１－２でも示したようにSilverらの結果によれば供試体の作製方法によって、単純せん断試験結果と三軸試験結果が異なる場合があることが分かる。また、龍岡ら（1986）も供試体作製方法や試料の相違に

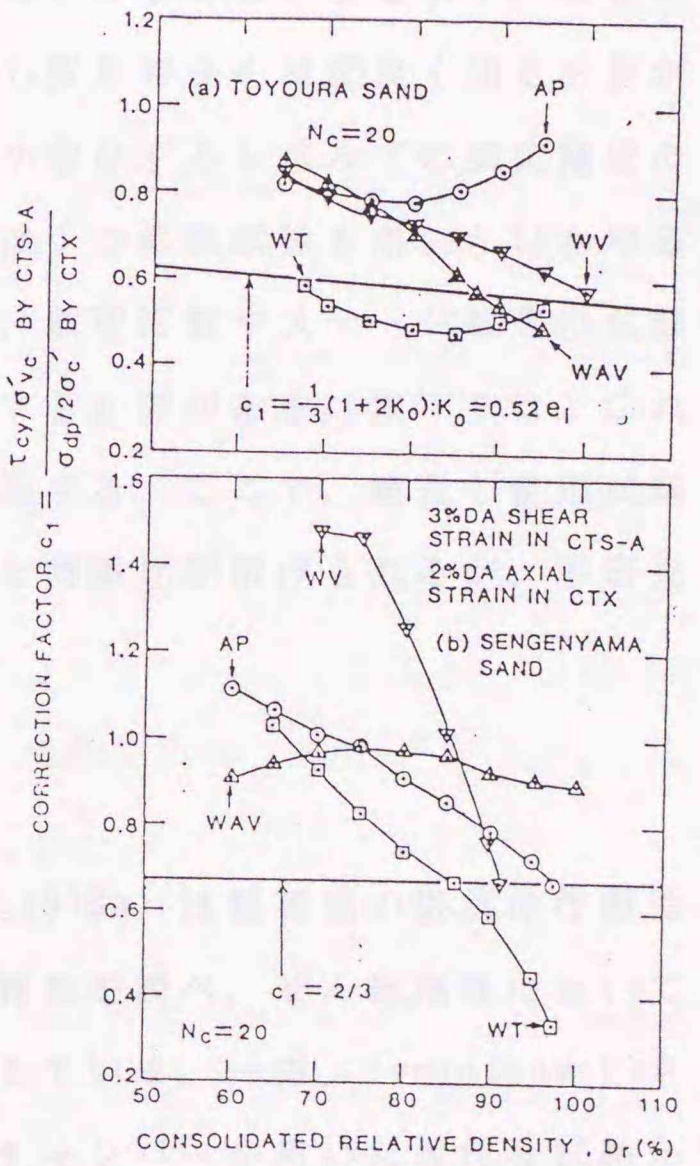


図１－７　補正係数 c_1 に及ぼす供試体作製方法の影響（龍岡ら，1986）

よって三軸試験と中空ねじり試験結果は異なることを指摘している。図１-７は石原らが示した補正係数c_1を龍岡らが種々の供試体作製法を用いた三軸試験と中空ねじり試験から求め比較したものである。図より、供試体作製方法が異なることによって三軸試験と中空ねじり試験の結果は多様に変化していることが分かる。このことは、試験装置の相違すなわち試験時の応力状態の相違によって得られる液状化強度は異なると言える。しかし、その違いが異方性の程度によってどの程度異なるのか定量的な評価はなされていない。

１．４．２　繰返し変形試験に及ぼす諸因子

室内試験から繰返し変形特性を求める場合、液状化試験と同様に三軸試験装置が一般に用いられている。三軸試験から繰返し変形特性を求める場合、その試験結果は液状化試験と同様な影響因子とともに、繰返し変形試験特有な影響因子も挙げられる。周知のように土質材料は金属材料と異なり強い非線形性を示し、微少なひずみレベルにおいてはほぼ弾性的な性質を示すのに対してひずみレベルが大きくなると、その剛性と減衰は強いひずみ依存性を示す。したがって、広範なひずみレベルにおける土の繰返し変形特性を精度良く知る必要がある。しかし、三軸試験においては、特に微小なひずみレベルでの測定精度の信頼性に問題がある。また、繰返し変形試験は１つの供試体を用いたいわゆるステージ試験によって行われる。したがって、載荷回数やステージ数等の試験方法が試験結果に及ぼす影響についても考慮する必要がある。以下では、これらの影響因子に関する過去の研究について概説する。ここで、繰返し変形試験結果に大きな影響を及ぼす因子として拘束圧と間隙比が挙げられるが、本研究とは直接関係しないので触れない。

１）供試体作製方法の影響

供試体作製方法の影響に関しては、龍岡ら（1979a）は数種類の供試体作製法を用いて中空ねじり試験によって繰返し変形特性を調べ、せん断剛性においても減衰定数においても、その影響は小さいとしている。一方、Jamiolkowskiら（1992）はＩＳＭＥＳのキャリブレーションチャンバーを用いた弾性波試験か

ら、供試体の鉛直方向と水平方向のせん断剛性は構造異方性によりおよそ２０％異なることを指摘している。ここで、龍岡らが研究を行った当時は、特に微小なひずみレベルでの測定精度が低かったため、微小なひずみレベル（１０$^{-6}$）においても供試体作製方法の影響が現れないのかは確かではない。したがって、供試体作製方法の影響はひずみレベルによっては異なることも考えられる。

２）応力履歴の影響

繰返し変形特性に及ぼす応力履歴に関して、現在のところ実験的に調べられているのは、静的履歴と動的履歴に大別される。静的な応力履歴に関しては過圧密履歴が挙げられるが、細粒分を含まない砂質土に関しては、間隙比の減少で説明のつかない過圧密履歴によるせん断剛性の増加はほとんどないと言われているが、細粒分を含む場合には剛性の増加が指摘されている。一方、動的履歴に関して、Drnevichら（1970）は図１－８に示すように６×１０$^{-4}$のひずみ履歴を６×１０^{3}回かけた場合、最大３０％程度剛性が増加することを示している。さらに履歴の回数を増やすと数倍の剛性が得られることを示している。一方、Teachavorasinskunら（1992）は３～７×１０$^{-4}$程度の繰返し履歴を７,０００～５００,０００回加えても剛性（Ｅmax）はほとんど変化しないことを報告している。このように動的な履歴に関しては実験結果が異なり明かではない点が多い。

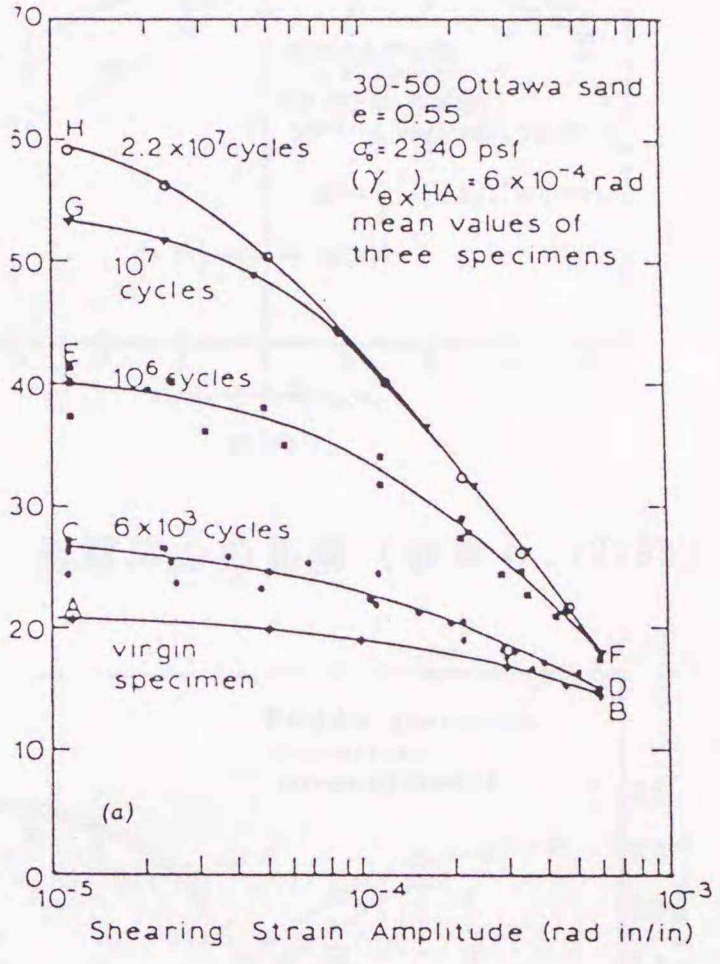


図１－８　動的ひずみ履歴の影響（Drnevichら，1970）

３）試験方法

試験方法に関しては、用いる試験装置や初期応力状態とともに、動的変形試験に特有な繰返し載荷時の排水条件、載荷回数、およびステージ数等の影響が挙げられる。

試験時の初期応力に関して、龍岡ら(1979b）は種々の応力比（σv／σh）の

もとで中空ねじり試験を行い、図１－９に示すように同じ平均主応力のもとでは水平応力が鉛直応力よりも大きくなるに従って剛性が低下するが、σｖ＞σｈの場合は大きな影響を及ぼさないことを示した。

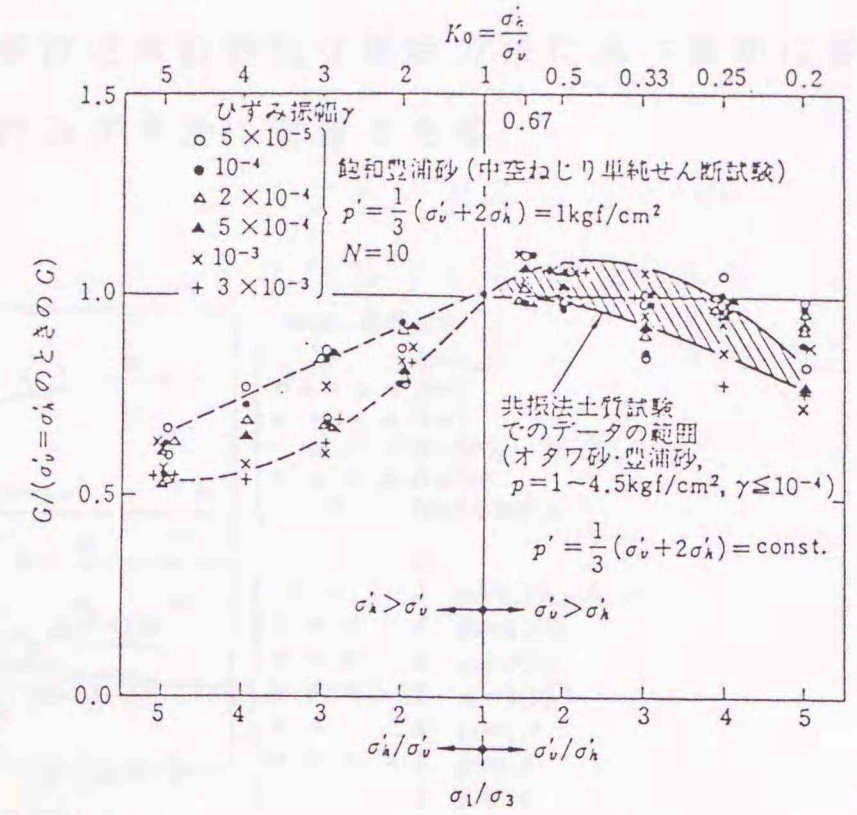


図１－９　初期応力の影響（龍岡ら，1979b）

排水条件に関しては、安田ら（1983）は中空ねじり試験によって繰返し載荷を排水および非排水状態で行い、せん断剛性は顕著な影響を受けないが非排水状態での減衰定数はひずみレベルが大きくなると低下することを示している（図１－10）。

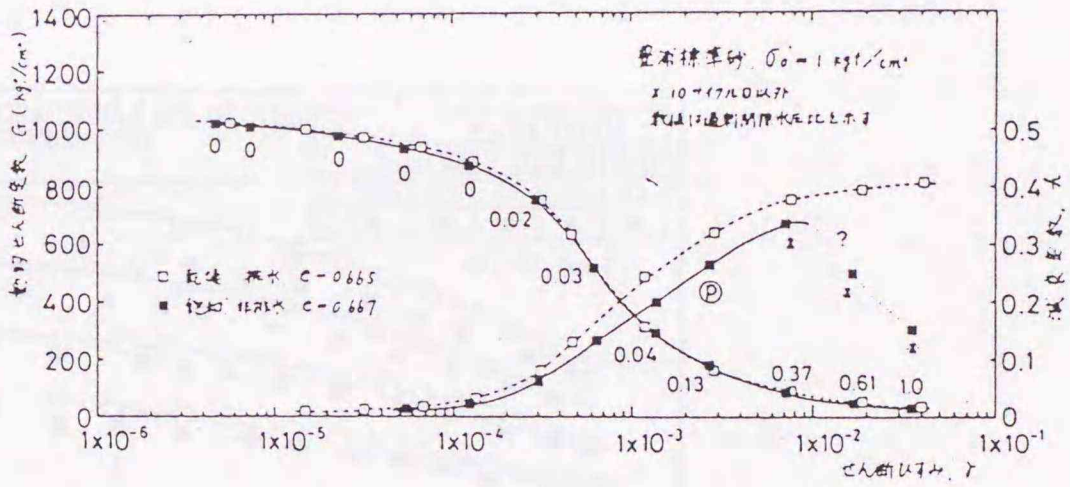


図１－10　排水条件の影響（安田ら，1983）

載荷回数の影響に関しては、せん断剛性には大きな影響を及ぼさないが減衰定数は求める載荷回数によって大きく異なることが指摘されている。図１－11は異なる研究者によって行われた試験結果を龍岡（1981）がまとめたものでである。図にはＮ回目の減衰定数と１０回目の減衰定数の差として示しているが、特にＮ＜１０での減衰定数の減少が大きいことが分かる。

試験装置の影響に関しては、同一の機関で異なる室内試験装置を用いて比較した例が少なく明らかにされていない面が多い。松本ら（1990）は、図１－12に示すように礫を用いて三軸試験と中空ねじり試験により結果を比較しているが三軸試験による剛性がやや低くなっている。龍岡ら（1991，1992）によれば三軸試験においては供試体の端面におけるベッディングエラーによって剛性が低くなることを指摘しており、三軸試験おいては微小なひずみレベルでの剛性

は低く測定される恐れがあると言える。

このように、繰返し変形試験は非常に小さな荷重や変位を測定する必要があるため、その試験結果に及ぼす因子は従来の静的な試験方法に比べ遙かに多く、その影響程度も大きいため、その評価が非常に重要である。

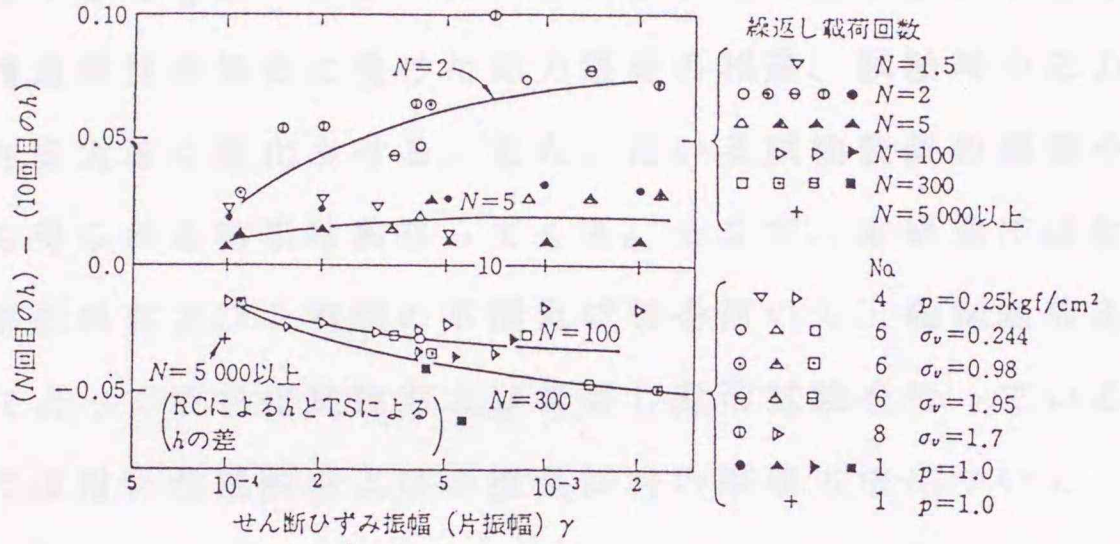


図1－11　hに及ぼす載荷回数の影響（龍岡，1981）

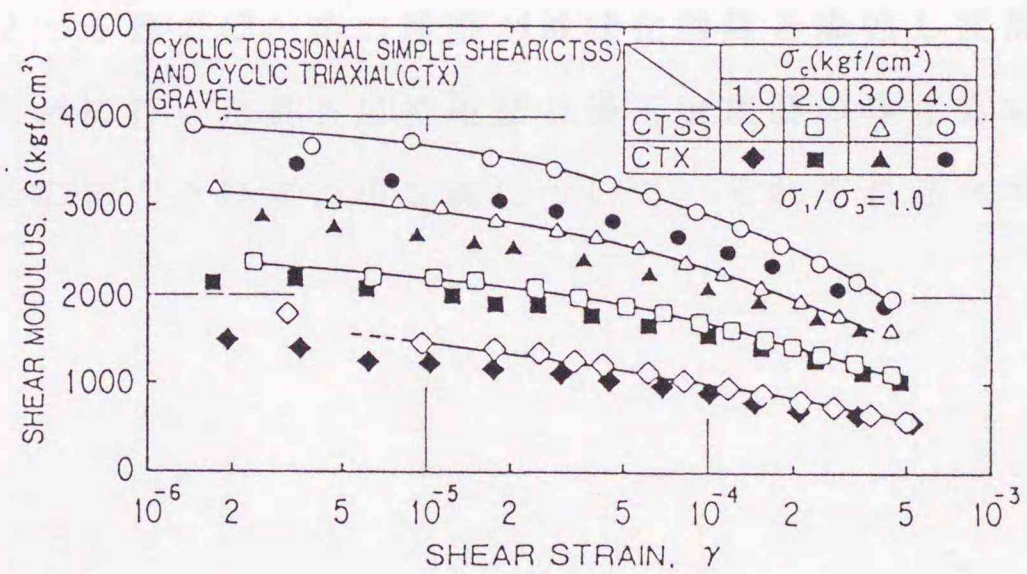


図1－12　三軸試験と中空ねじり試験の比較（松本ら，1990）

第２章　試料および試験方法

２．１　概　説

本章では、本研究で用いた試料および実施した試験の装置とその内容について述べる。第１章でも述べたように、砂の液状化特性や繰返し変形特性は用いる供試体の構造特性や過去に受けた応力履歴の相違、試験時の応力状態によって、その特性を大きく変化させる。また、用いる試験装置の種類や供試体の寸法によっても得られる結果は異なってくる。そこで、本研究では粒径の異なる６種類の攪乱試料および３種類の不攪乱試料を用いて三軸試験装置と中空ねじり試験装置によって液状化試験および繰返し変形試験を行っている。

２．２節では用いた試料および不攪乱試料の採取方法について、２．３節では、異方性の異なる供試体を作製するために用いた４種類の供試体作製装置について、２．４節では本研究で用いた三軸試験装置と中空ねじり試験装置の概要、および繰返し変形試験における微小なひずみレベルでの変形量の測定方法について、２．５節では、応力履歴が液状化強度と繰返し変形特性に及ぼす影響を調べるために行った異方圧密履歴と過圧密履歴の与え方および試験結果を整理する上での応力とひずみの定義について、それぞれ述べている。

２．２　試　料

本研究で用いた砂試料は、北海道内の２地点から採取した３種類の不攪乱試料および１種類の攪乱試料と国内で市販されている２試料である。以下に各試料の採取方法およびその物理的性質について述べる。

２．２．１　不攪乱試料の採取

採取した不攪乱試料は、北海道石狩町石狩湾新港中央水路建設地点からトリプルチューブサンプリング法によって採取した深度の異なる３種類の不攪乱試料（以下深度の浅い方から石狩No.1,2,3砂と略称）である。サンプル径は82mmおよび120mmでそれぞれ三軸試験と中空ねじり試験による液状化試験に用いた。写真２－１には、φ＝120mmのサンプルチューブで採取した試料を、図２－１および表２－１に採取状況および採取深度等を示す。なお、各試料の平均相対密度は個々の供試体に対して最大・最小密度試験を行い求めたものである。採取した試料は原位置で一昼夜脱水した後、ドライアイスで凍結させ実験室に搬入して試験を行った。



写真２－１　トリプルチューブサンプリング（φ＝120mm）

表２－１　石狩砂の採取深度と応力状態

試料名	採取深度（m）	有効土被り圧（kgf/cm²）	供試体の平均相対密度（%）
石狩No.1	8.3～10.0	1.25	77
石狩No.2	13.3～15.0	1.7	92
石狩No.3	17.3～19.2	2.1	100

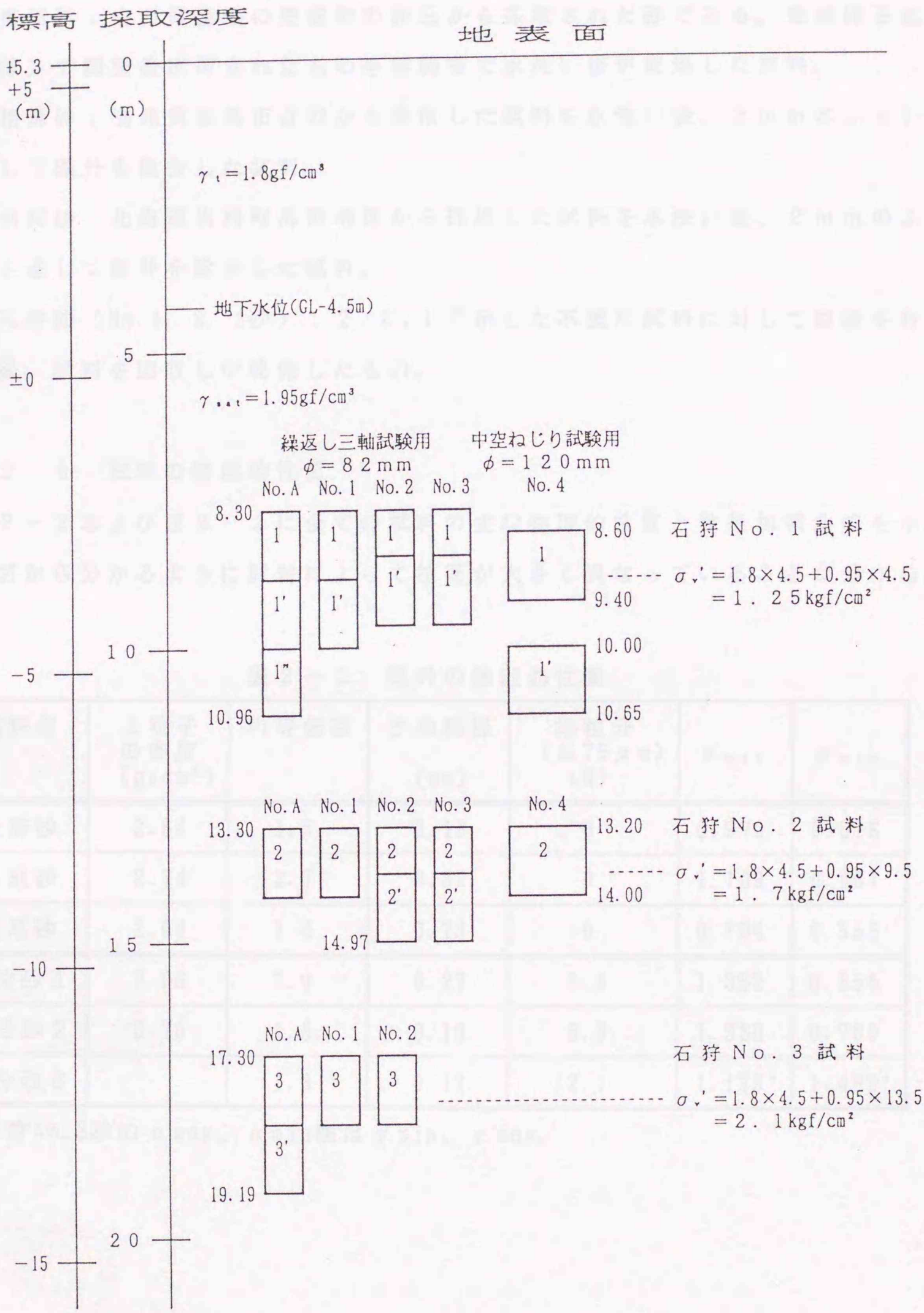


図２－１　不撹乱石狩砂試料のサンプリング状況

２．２．２　再構成試料

再構成試料は以下に示す６種類の試料を用いた。

１）豊浦砂：山口県西端の豊浦町の砂丘から採取された砂である。豊浦硅石鉱業（株）で調整後出荷されたものを実験室で水洗い後炉乾燥した試料。

２）相馬砂：福島県相馬市近郊から採取した試料を水洗い後、２ｍｍのふるいを通して礫分を除去した試料。

３）当別砂：北海道当別町高岡地区から採取した試料を水洗い後、２ｍｍのふるいを通して礫分を除去した試料。

４）石狩砂（No.1，2，3砂）：２．２．１で示した不攪乱試料に対して試験を行った後、試料を回収し炉乾燥したもの。

２．２．３　試料の物理的性質

表２－２および図２－２に全ての試料の主な物理的性質と粒径加積曲線を示す。図から分かるように試料によって粒径が大きく異なっていることが分かる。

表２－２　試料の物理的性質

試料名	土粒子の密度 (g/cm³)	均等係数	平均粒径 (mm)	細粒分 (≦75μm) (%)	e_{max}	e_{min}
豊浦砂	2.64	1.5	0.18	0	0.970	0.618
当別砂	2.74	2.7	0.32	0	1.109	0.681
相馬砂	2.64	1.6	0.73	0	0.804	0.553
石狩砂１	2.66	1.9	0.27	0.8	1.352	0.856
石狩砂２	2.70	1.8	0.13	8.3	1.338	0.790
石狩砂３	-	1.8	0.12	12.7	1.123*	1.493*

*石狩No.3砂のｅmax、ｅmin欄はγmin、γmax。

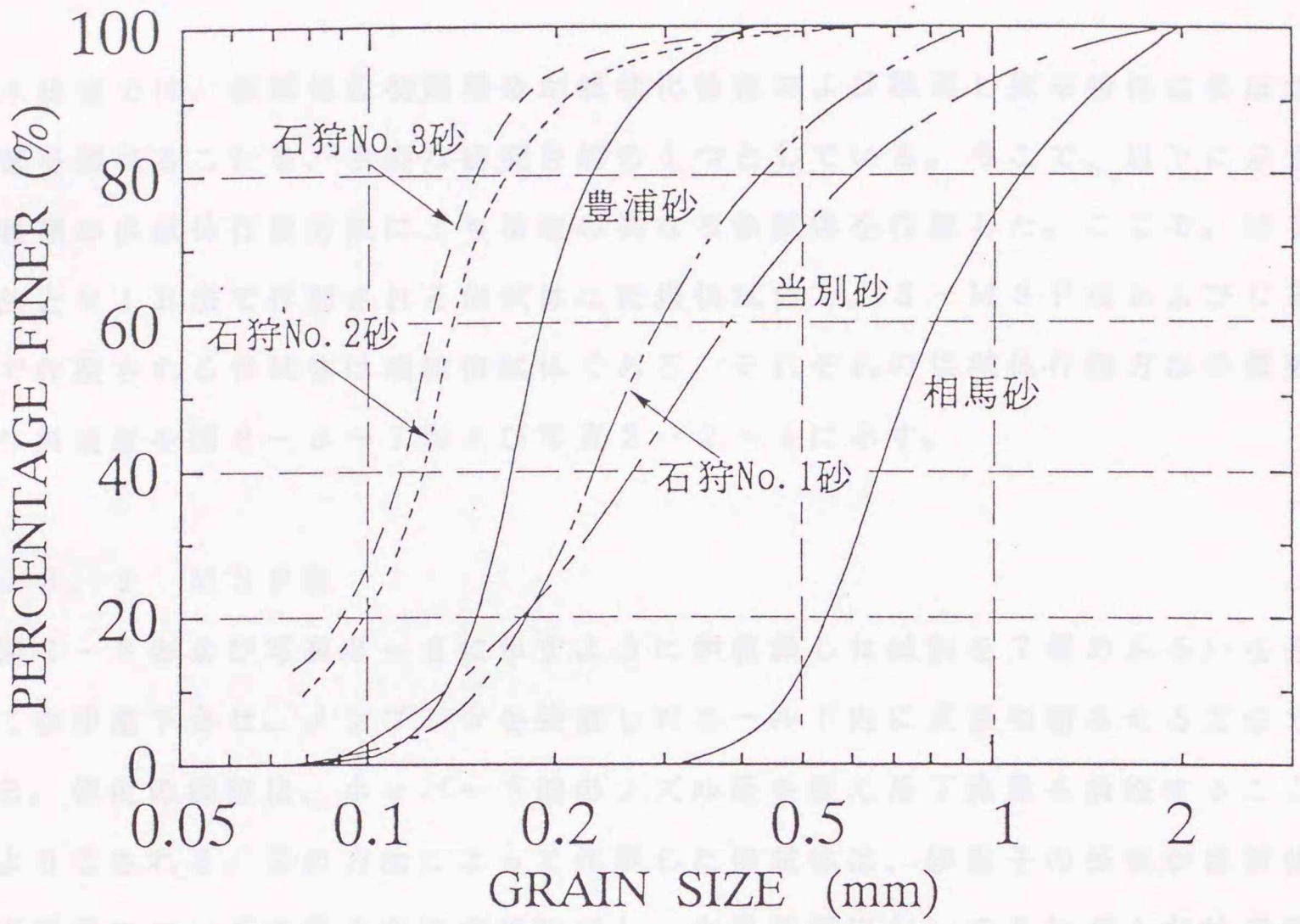

100
80
60
40
20
0
PERCENTAGE FINER (%)
石狩No. 3砂
豊浦砂
当別砂
石狩No. 2砂
相馬砂
石狩No. 1砂
0.05
0.1
0.2
0.5
1
2
GRAIN SIZE (mm)

図２－２　粒径加積曲線

２．３　供試体作製方法

本研究では、供試体の初期構造が液状化特性および繰返し変形特性に及ぼす影響を調べることを、主要な研究目的の１つとしている。そこで、以下に示す４種類の供試体作製方法により構造の異なる供試体を作製した。ここで、ＭＳＰ法とＶＩＢ法で作製される供試体は乾燥供試体で、Ｓ－ＭＳＰ法およびＣＥ法で作製される供試体は凍結供試体である。それぞれの供試体作製方法の概要と作製装置を図２－３～７および写真２－２～４に示す。

２．３．１　ＭＳＰ法

図２－３および写真２－２に示すように炉乾燥した試料を７層のふるいを通して空中落下させ、メンブレンを装着したモールド内に直接堆積させる方法である。密度の調整は、ホッパー下端のノズル径を変え落下流量を調整することによりなされる。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つ初期構造を有している。また、供試体は三軸圧縮条件下よりも三軸伸張条件下で変形し易いという力学特性を有していることが明らかにされている（三浦ら,1982,1984a）。

２．３．２　Ｓ－ＭＳＰ法

原理的には、ＭＳＰ法と同じ方法で作製した供試体である。作製手順は，図２－４に示すように、スリット式サンドホッパーから12層のふるいを通して小型砂槽に砂試料を堆積させ、その後、飽和→サクション→凍結の過程を与えた砂槽から、供試体の軸方向が鉛直（R_BV），45°（R_BD）および水平（R_BH）方向と一致するように切り出し成形している。密度の調整はＭＳＰ法と同様に砂粒子の落下流量を調節することによって行う。なお、０．１kgf/cm²の定荷重のもとでの凍結過程においては、体積膨張は生じないことが確かめられている（三浦ら,1984b）。したがって、R_BV供試体の構造特性は、ＭＳＰ供試体のそれと同一であると考えてよい。また、図２－５に作製した各供試体が持つと想像される粒子配列構造特性の模式図を示している。

２．３．３　ＶＩＢ法

写真２－３に示すように、漏斗を用いて炉乾燥試料を落下高さゼロでモールドに堆積させた後、電動バイブレータ（INAX製）によってモールド側面から締固めて作製する方法である。密度の調整は、所定の重量の砂試料をカラーを取り付けたモールド内に注いだ後、試料の上端が所定の位置まで締め固められるまで振動を加えることによって行う。

２．３．４　ＣＥ法

図２－６および写真２－４にこの方法による供試体作製方法の手順を示している。内径１０ｃｍ長さ２８ｃｍの２重構造のモールドを２組のホイール上に置く。一方のホイールはゴムベルトによってモーターに連結されており、ホイールを回転することによってモールドも回転する。モールドが回転した状態で、モールドの中心部より砂を詰めた矩形のトラフを用いてモールドの内面に砂を堆積させる。砂が堆積した後、無数の小穴があるチューブを用いて中心部より水が注がれる。試料全体が湿潤状態になった後、注水を止めそのまま回転させ、モールドに空いた小穴から脱水を行う。その後モールドの回転を止め内モールドのみを抜き出し冷凍庫で冷凍する。この段階で試料の含水比は約７％である。凍結後、試料の端面と中空部の内側を成形して供試体を作製する。密度の調整は、回転スピードの調節とモールド内に堆積させる砂量を調整することによって行った。試料によって多少の差はあるが、豊浦砂の場合相対密度Ｄｒ＝５０～９０％程度の供試体が作製できる。図２－７には、試料がモールドの回転によって受けるＧと回転数の関係を示している。実際に行った回転数は５００－７００ｒｐｍ程度であった。

原理的には遠心力によって試料を側面に堆積させ、回転による遠心力と振動によって締め固めるものであるから。構造的にはＭＳＰ法よりもＶＩＢ法で作製した供試体に対称的な構造が得られると考えられる。

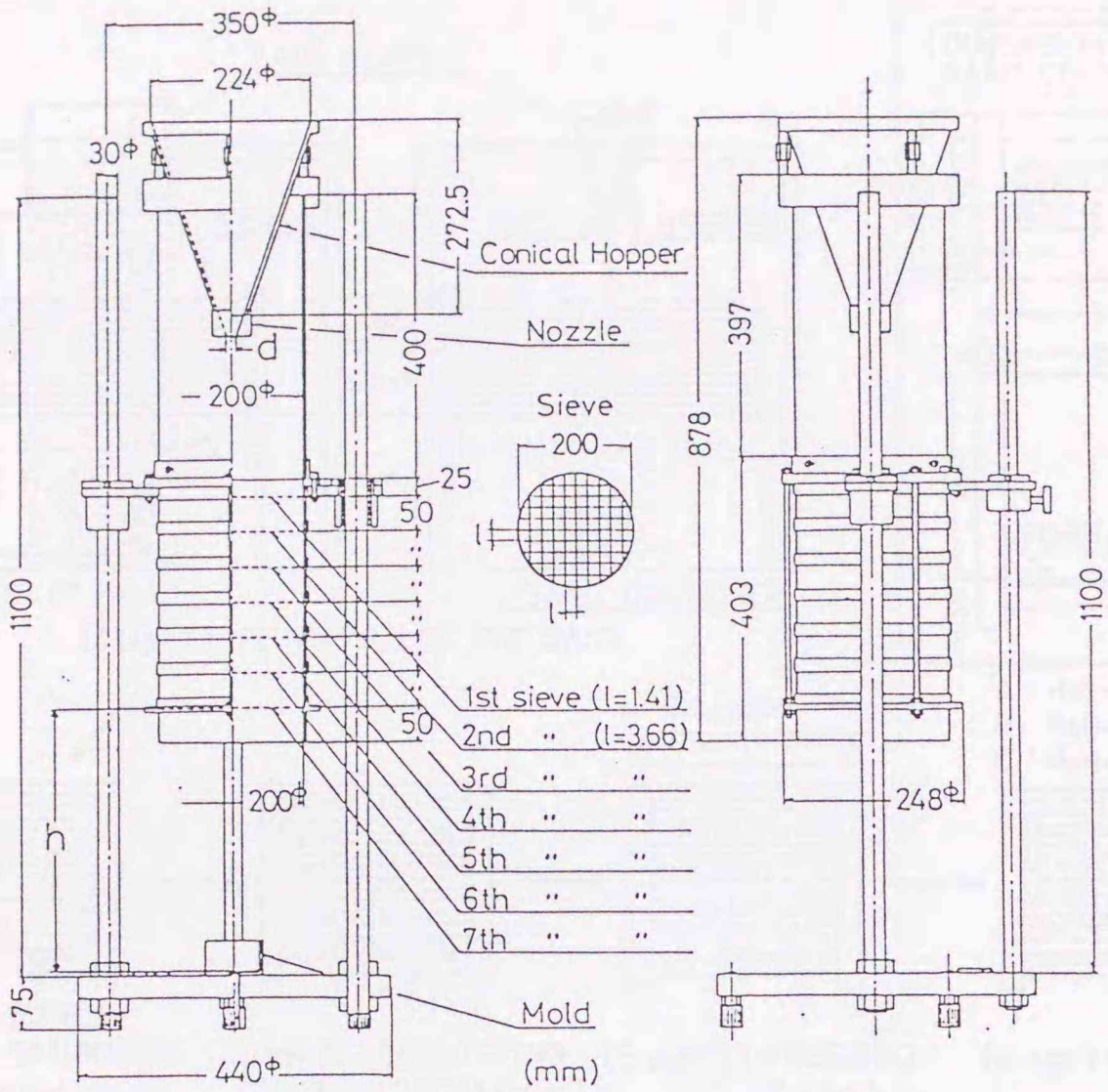


図２－３　ＭＳＰ法（多重ふるい落下法）



写真２－２　ＭＳＰ法

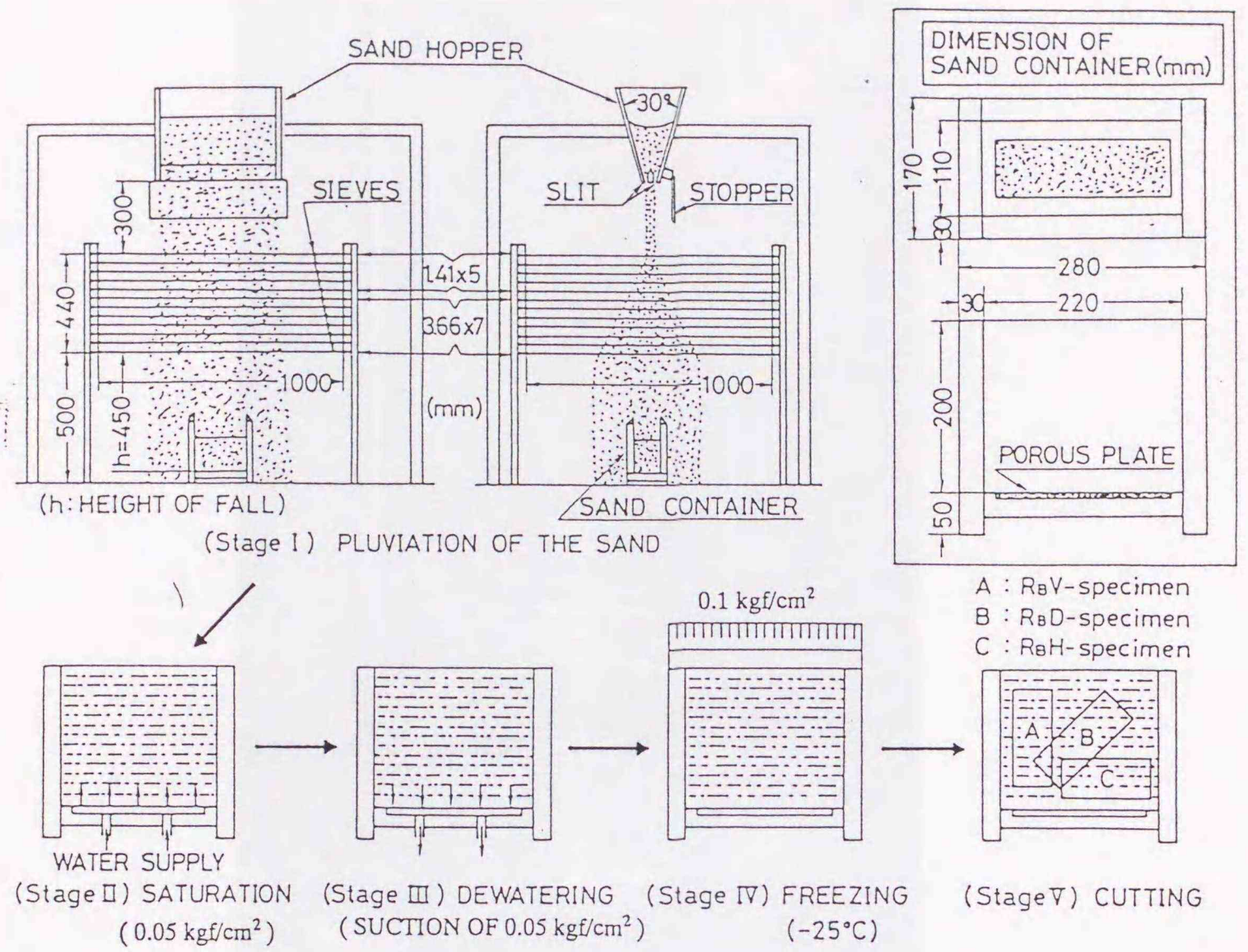


図２－４　Ｓ－ＭＳＰ法（スリット式多重ふるい落下法）

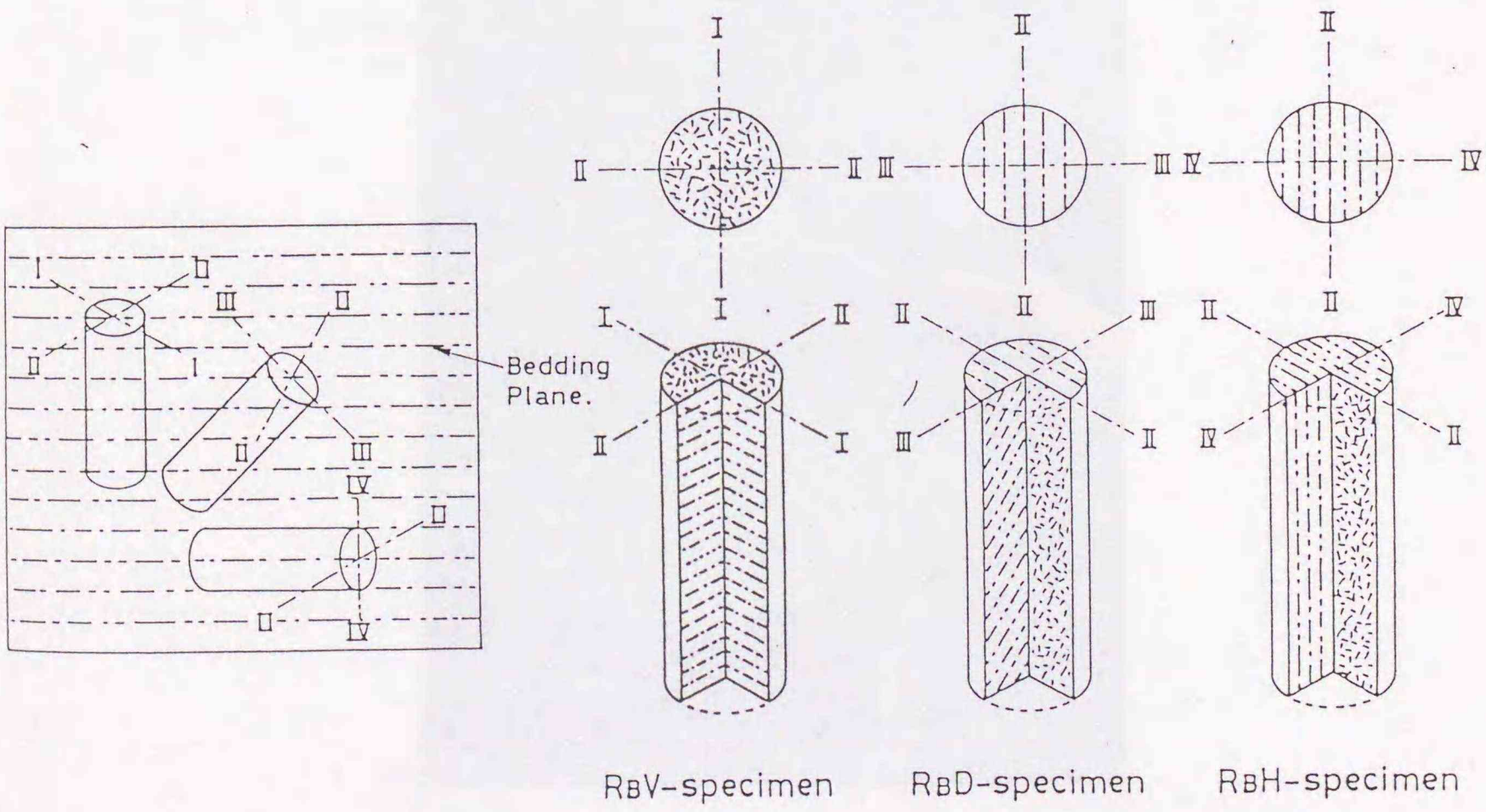


図２－５　Ｓ－ＭＳＰ法による供試体の粒子配列構造の模式図

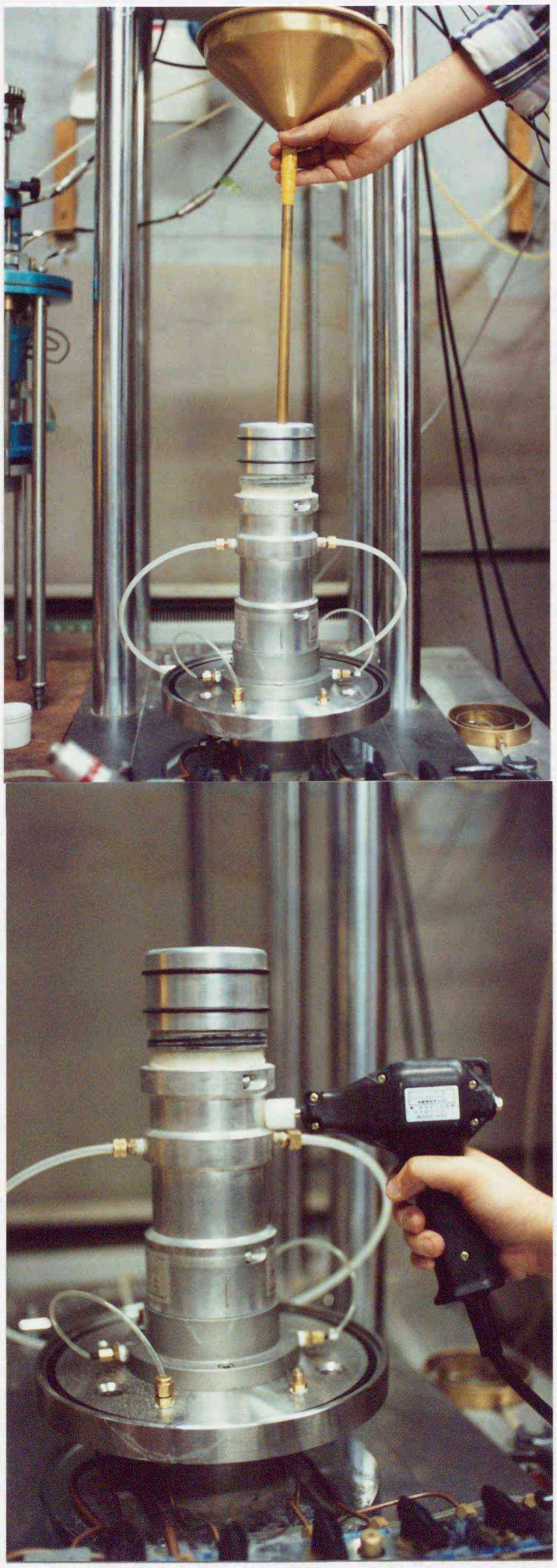


写真２－３　ＶＩＢ法（バイブレータ法）

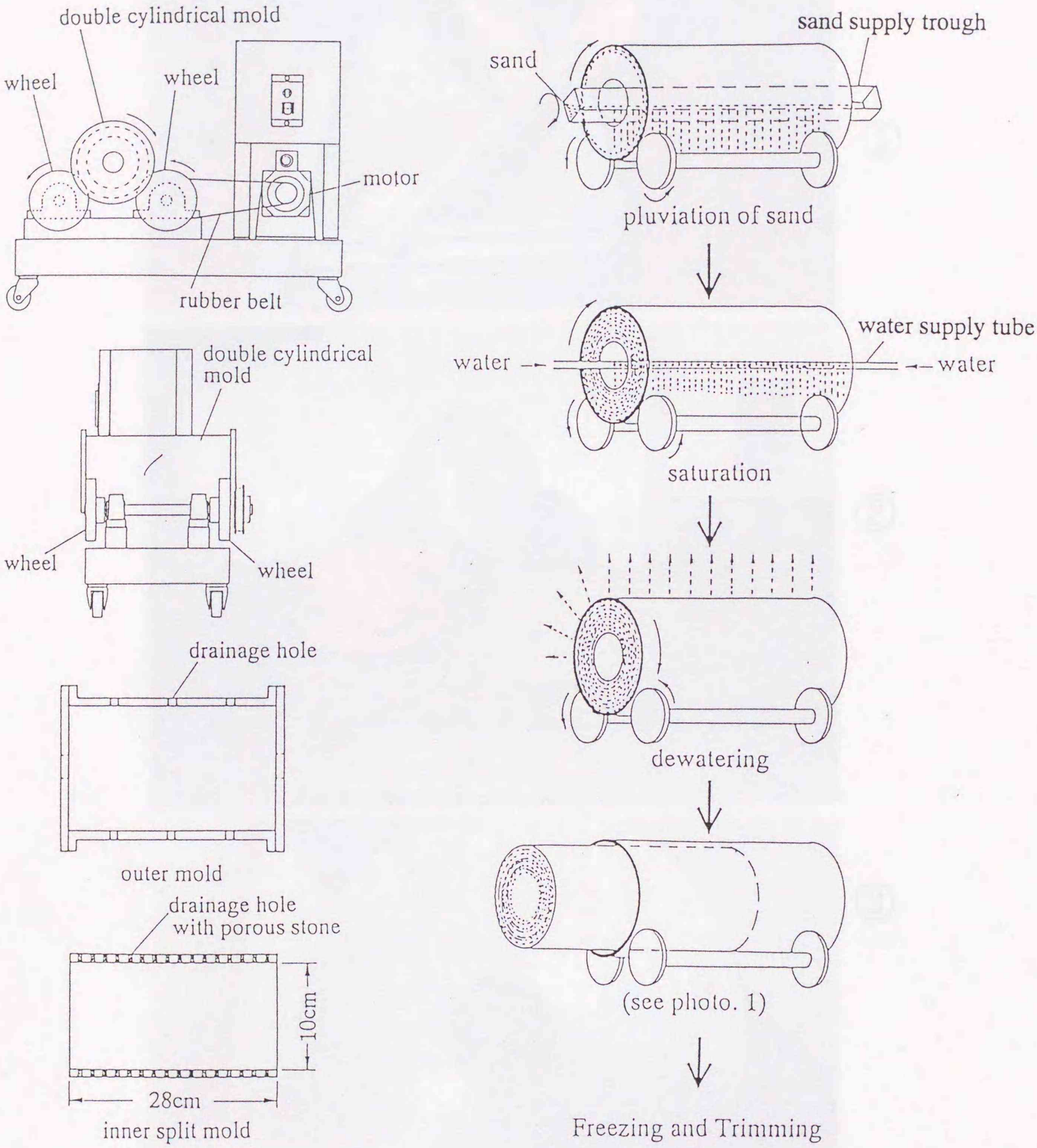

double cylindrical mold
wheel
wheel
motor
rubber belt
double cylindrical mold
wheel
wheel
drainage hole
outer mold
drainage hole with porous stone
10cm
28cm
inner split mold
sand supply trough
sand
pluviation of sand
water supply tube
water
water
saturation
dewatering
(see photo. 1)
Freezing and Trimming

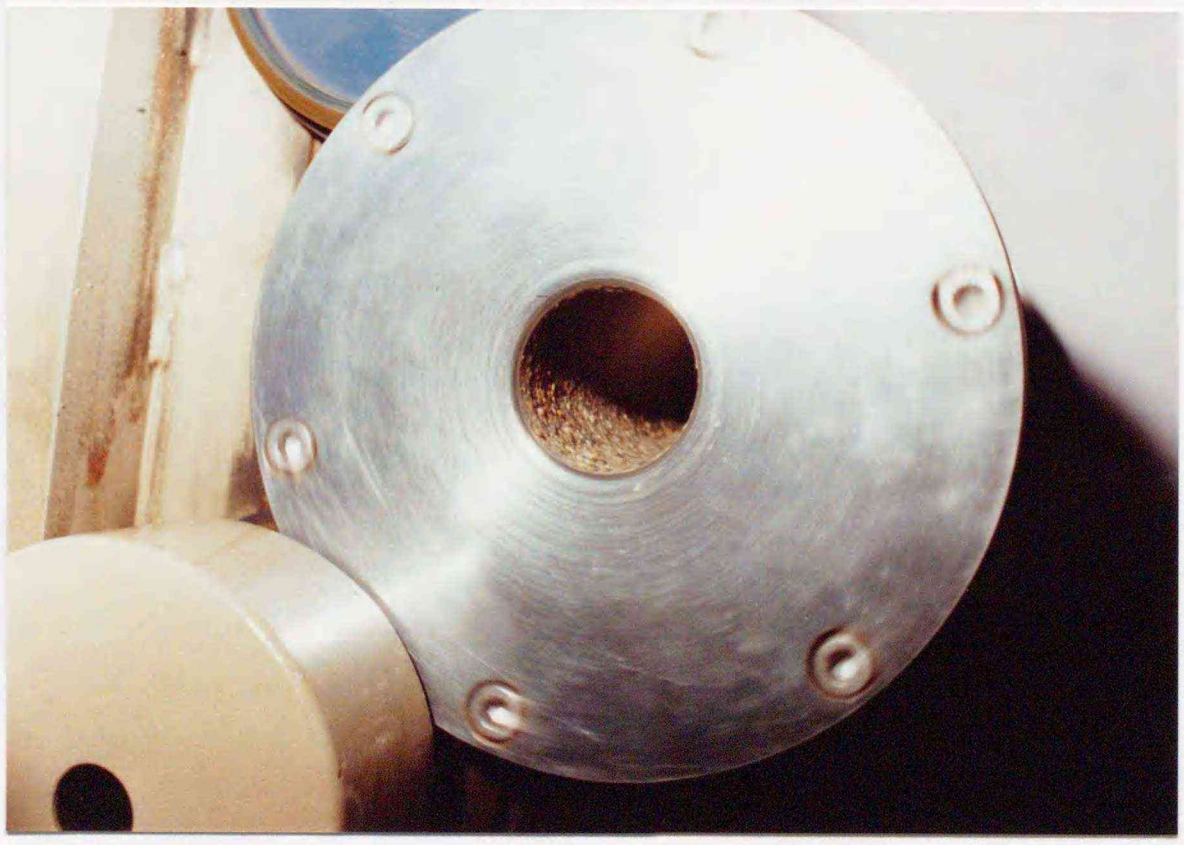
図２－６　ＣＥ法（遠心力法）



①

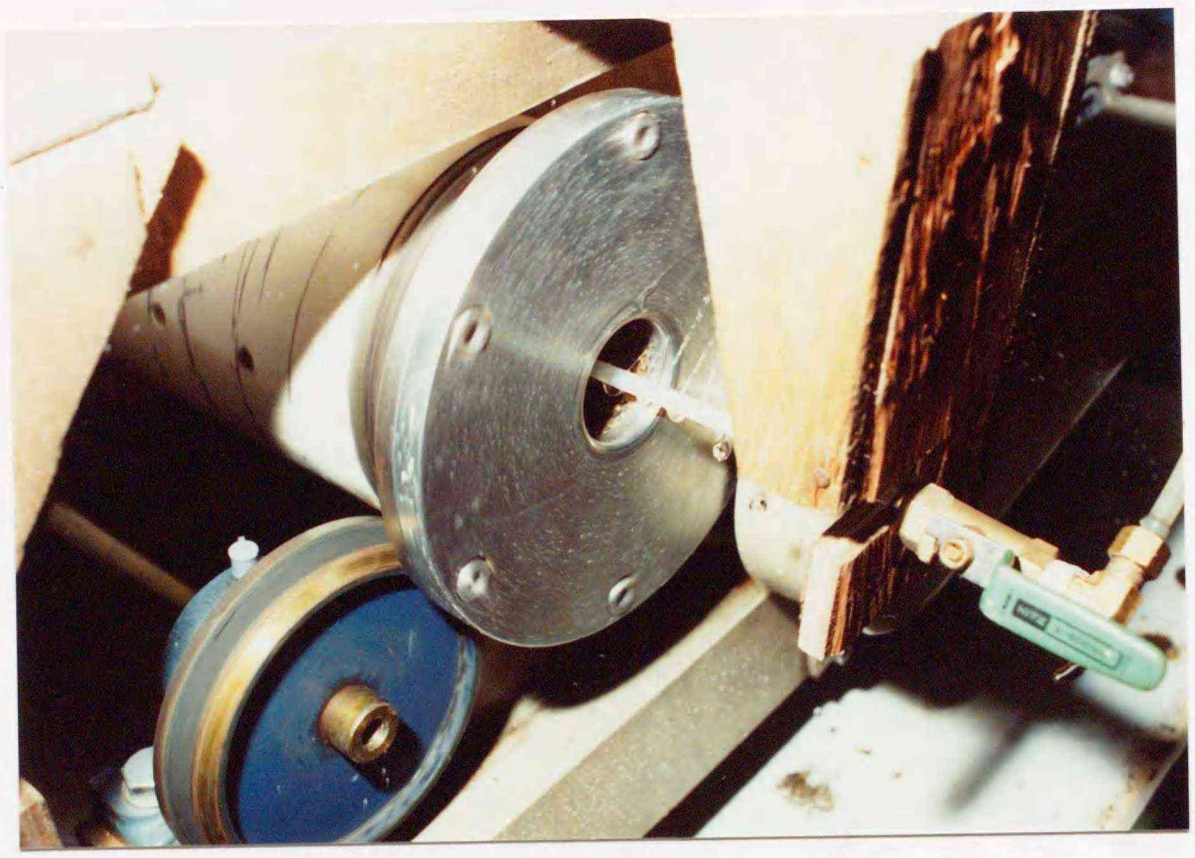


②

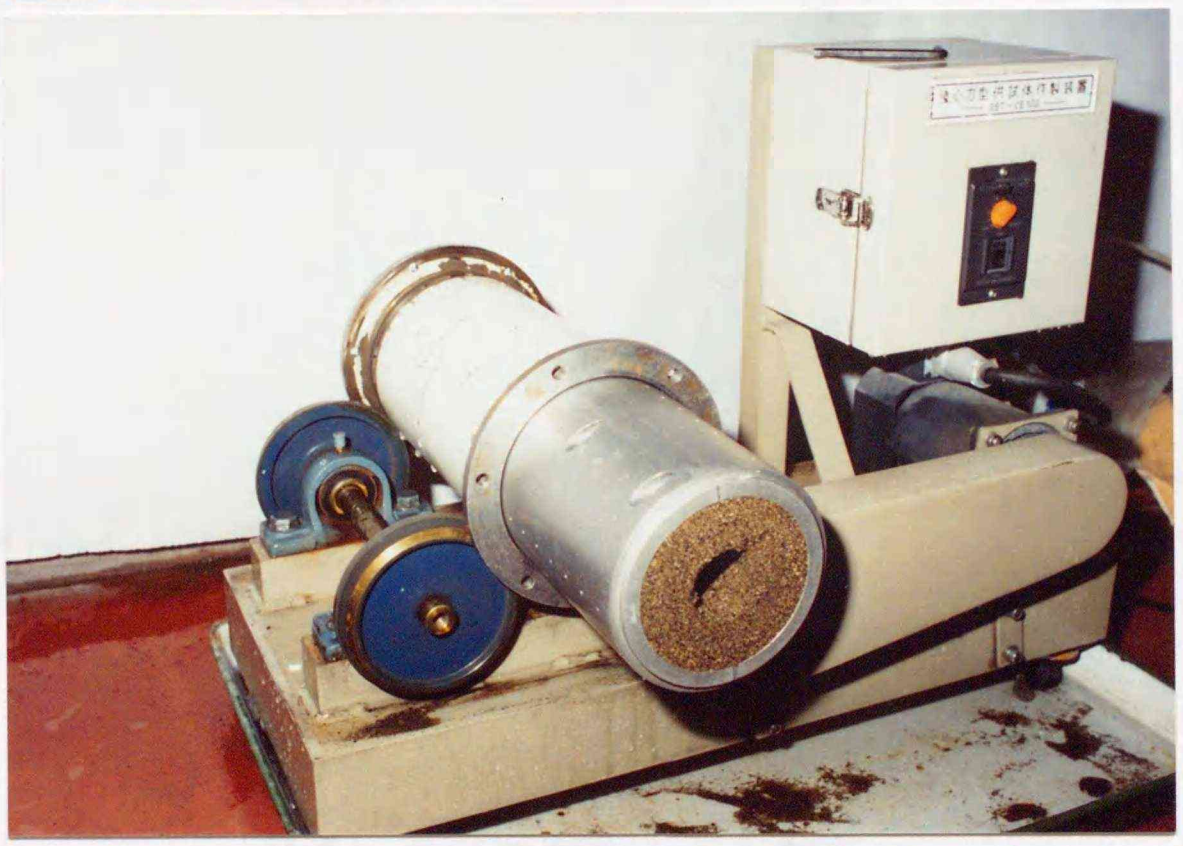


③

写真２－４　ＣＥ法



④

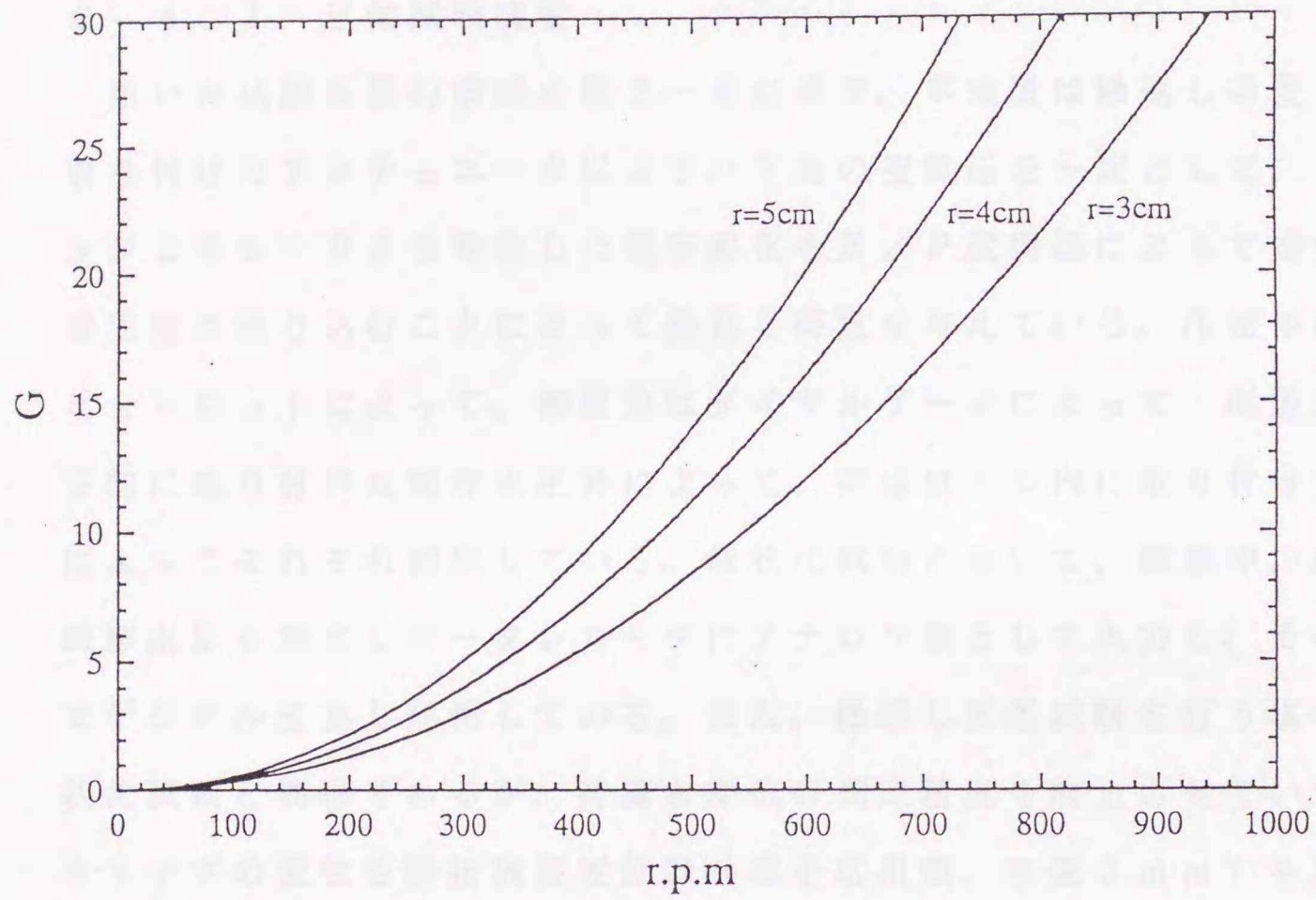


⑤



⑥

写真２－４　ＣＥ法



G	r p m		
	r =3cm	r =4cm	r =5cm
0	0	0	0
1	173	149	134
2	244	211	189
3	299	259	232
4	345	299	267
5	386	334	299
6	423	366	327
7	457	395	354
8	488	423	378
9	518	448	401
10	546	473	423
11	572	496	443
12	598	518	463
13	622	539	482
14	646	559	500
15	668	579	518
16	690	598	535
17	712	616	551
18	732	634	567
19	752	652	583
20	772	668	598
21	791	685	613
22	810	701	627
23	828	717	641
24	846	732	655
25	863	747	668
26	880	762	682
27	897	777	695
28	913	791	707
29	929	805	720
30	945	819	732

図 2 － 7　回転数とＧの関係

２．４　試験装置

本研究では、液状化強度試験および繰返し変形試験を行うために三軸試験装置と中空ねじり試験装置の２種類の試験装置を用いている。以下でその概略を説明する。

２．４．１　三軸試験装置

用いた試験装置の概略を図２－８に示す。本装置は繰返し荷重をセル上部に取り付けたアクチュエータにより、下室の空気圧を一定として、ファンクションジェネレータより発生した電圧変化をＥ／Ｐ変換器によって空気圧に変換させ上室に送り込むことによって繰返し荷重を与えている。圧密中の体積変化はビューレットによって、軸変位はダイヤルゲージによって、間隙水圧は供試体下部に取り付けた間隙水圧計によって、荷重はセル内に取り付けたロードセルによってそれぞれ測定している。液状化試験において、試験中、荷重、軸変位、間隙水圧を測定しデータレコーダにアナログ値として入力し、その後パソコンでデジタル変換し解析している。また、繰返し変形試験を行う場合は、ほぼ液状化試験と同様であるが、荷重と変位の測定精度を向上させている。軸変位はキャップの変位を非接触型変位計（電子応用製、容量２ｍｍ）を用いて測定し、得られる荷重と変位の電圧変化を直流増幅器で増幅してコンピュータに直接入力し解析している。増幅率は、荷重に対しては最大１０倍、変位に対しては最大１００倍に増幅している。

供試体と接する上下端面はジュラルミン（キャップ）およびステンレス（ペデスタル）製で、中央部に直径１ｃｍのポーラスストーンが埋め込まれている。供試体の寸法は直径７ｃｍ、高さ１７ｃｍである。用いたメンブレンの厚さは全ての試験で０．２ｍｍである。

２．４．２　中空ねじり試験装置

試験装置の概略を図２－９に示す。本装置は三軸試験装置と同様に空気圧変化をアクチュエータに送り込み、繰返し荷重またはトルクを供試体に与えている。

供試体に加える各種の応力は、図に示すように、コンピュータからＤＡコンバータを介して、電圧変化をＥ／Ｐ変換器で空気圧に変換しそれぞれ載荷される。軸荷重はＥ／Ｐ変換器からの空気圧をアクチュエータの上室に送り込むことによって、トルクは２つのアクチュエータの一方にＥ／Ｐ変換器からの空気圧を送り込み歯形ベルトによって供試体に与えられる。また、内圧（供試体内空の圧力）、外圧（供試体外側面の圧力）および背圧は、Ｅ／Ｐ変換器からの空気圧をブースターおよびリレーを介してそれぞれ供試体に加えられる。なお、本研究では全ての試験を通じて、内外圧を等しくしている。

供試体に加わる各種応力は以下のように測定される。 1）軸荷重およびトルクはセル内に取り付けたトルクロードセルにより、 2）軸変位はダイヤルゲージによって、ねじれ角はポテンショメータによって、3)内外圧および間隙水圧は圧力変換器によって、 4）供試体体積変化は二重管ビュレットの水位差を差圧計で読み取ることによって、それぞれ測定している。各々の測定値はアンプおよび１２ｂｉｔのＡＤコンバータを介してコンピュータに入力される。コンピュータはこれら計測データをもとに、各種の応力の制御を行っている。本試験装置を採用することによって、供試体作製後、試験終了まで自動制御で試験が可能である。また、圧密中に種々の応力履歴を与えることや、各種の応力経路でのせん断も自動制御で可能である。

供試体と接する上下端面は高さ２ｍｍの６枚の刃の付いた環状のポーラスストーンである。供試体の寸法は内径６ｃｍ、外径１０ｃｍ、高さ１０ｃｍまたは２０ｃｍの中空供試体である。また、キャップおよびペデスタルを交換することによって直径７ｃｍ、高さ１７ｃｍの中実の供試体に対しても試験を行うことができる。用いたメンブレンの厚さは全ての試験で０．２ｍｍである。

動的変形試験を実施する際は、ほぼ液状化試験と同様であるが、荷重と変位の測定精度を向上させるために、軸変位はキャップの変位を非接触型変位計（電子応用製、容量２ｍｍ）を用いて、ねじれ角も同様にキャップの変位を非接触変位計（容量８ｍｍ）を用いて測定し、得られる荷重と変位の電圧変化を直流増幅器で増幅してコンピュータに入力し解析している。増幅率は、荷重に対しては最大１０倍、変位に対しては最大１００倍に増幅している。

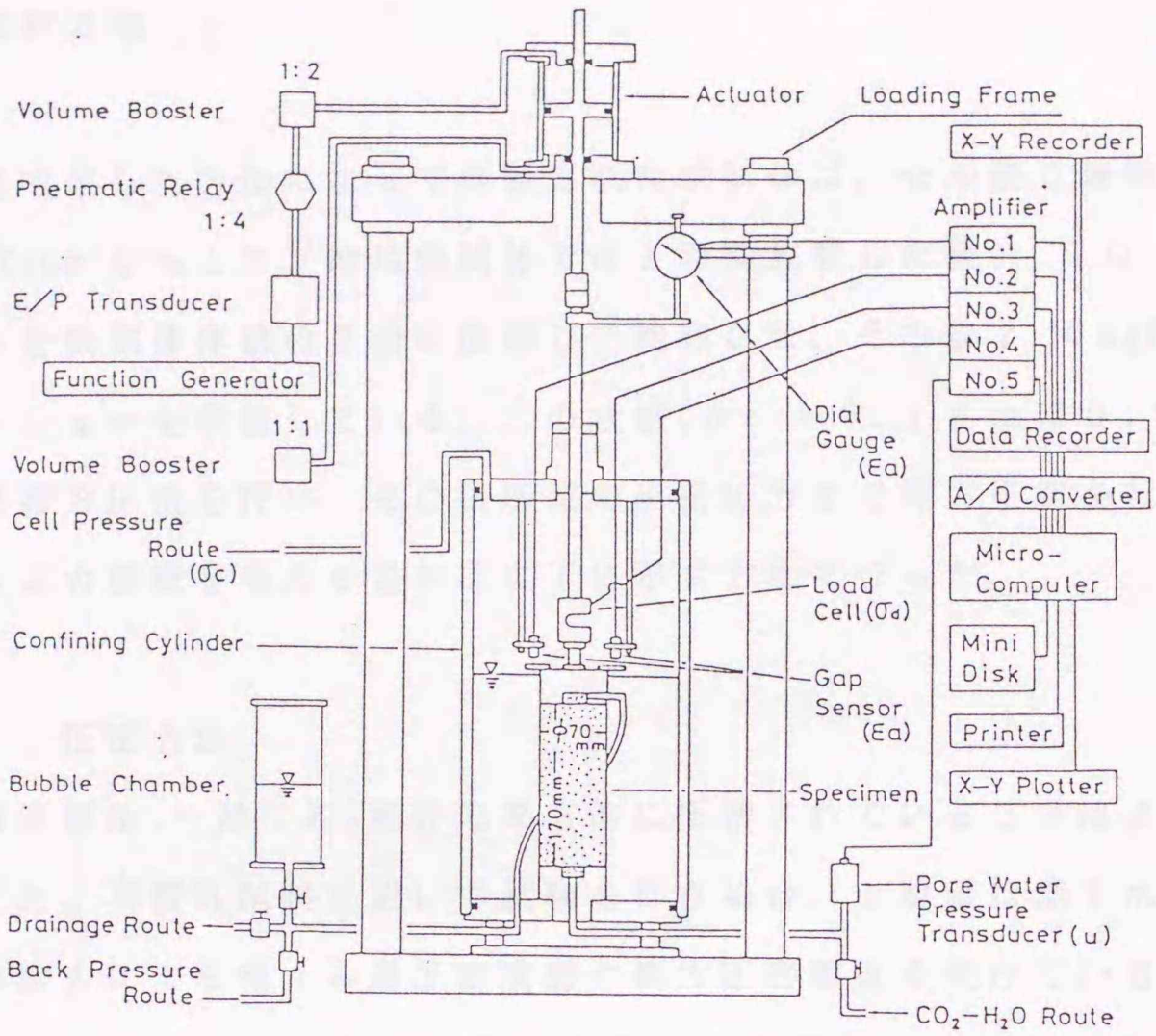


図２－８　三軸試験装置

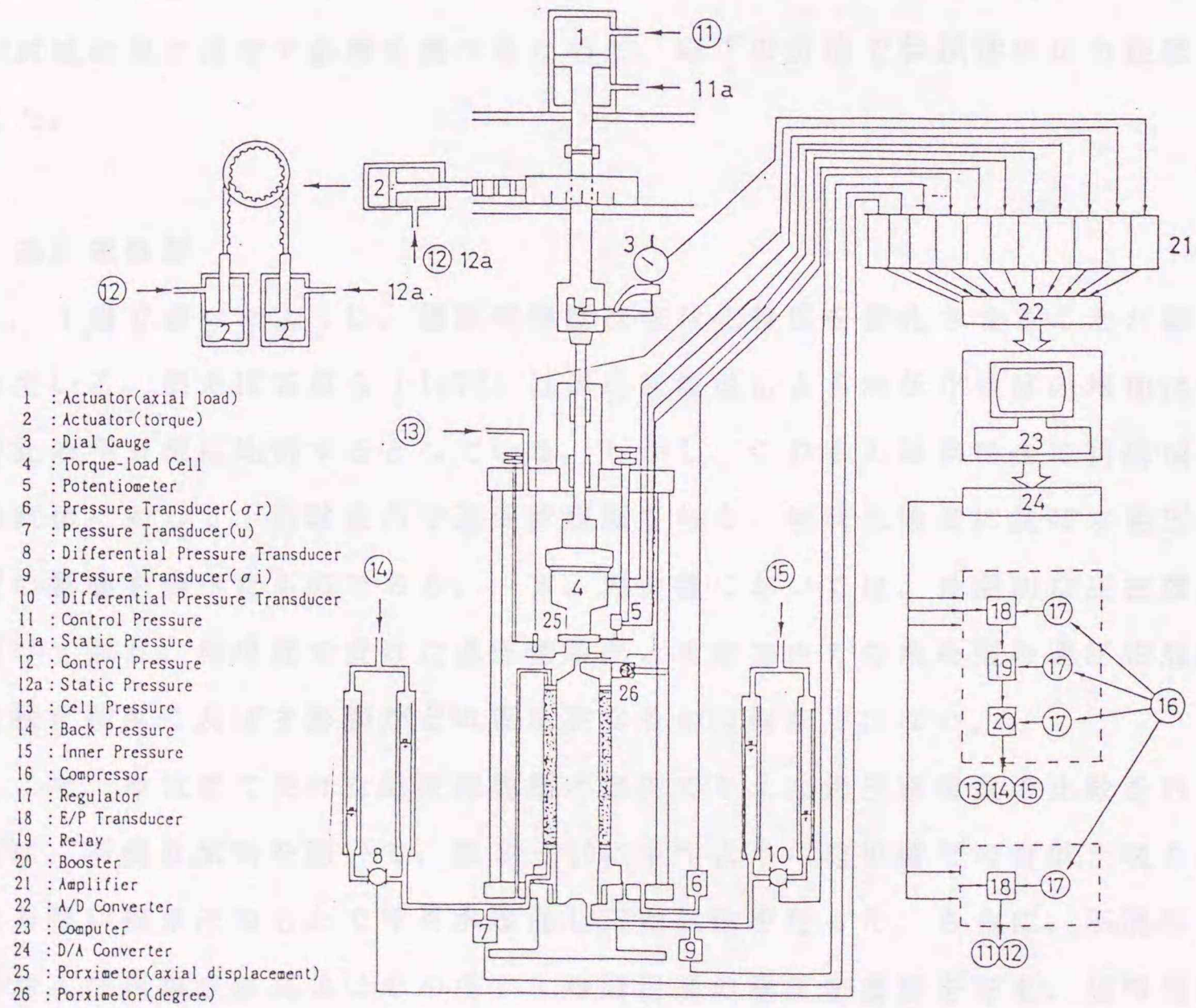


図２－９　中空ねじり試験装置

２．５　試験方法

２．３節で示した方法によって作製された供試体は、セル組立後拘束圧σc'＝０．２kgf/cm²のもとで（凍結供試体では１時間放置した後）、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２．０kgf/cm²のバックプレッシャーを供給している。この状態（σc'＝０．１または０．３kgf/cm²）で１５分間等方圧密を行い、その後所定の圧密圧力まで等方圧密を行った。また、種々の応力履歴を与える場合は以下に示す方法で行った。

２．５．１　圧密方法

自然堆積地盤は、一般にK₀条件で異方的に圧密され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過圧密履歴や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。さらに、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。そこで、異方圧密履歴と過圧密履歴が試験結果に及ぼす影響を調べるために、以下の方法で供試体に応力履歴を与えた。

１）過圧密履歴

１．４節で述べたように、過圧密履歴は液状化特性を変化させることが認められている。例えば石原ら（1979）は過圧密履歴による液状化強度の増加は過圧密比の平方根に比例するとしている。しかし、これらの結果は全て再構成した供試体に対して、実験室内で過圧密履歴を与え、液状化強度に及ぼす過圧密履歴の影響を調べたものである。一方、原位置においては、長期的な圧密履歴を受けており、原位置で受けた過圧密履歴と実験室内での短時間の過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響がどの程度異なるかは確かではない。

そこで、原位置で受けた過圧密履歴と室内で与えた過圧密履歴の比較を行うために、不攪乱試料を用いて、図２－10に示すように原位置での有効土被り圧よりも低い拘束圧のもとで非排水繰返し三軸試験を行った。さらに、不攪乱供試体および再構成供試体にセル内で１時間程度の過圧密履歴を与え、短時間の

過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響も調べた。また、過圧密履歴が繰返し変形特性に及ぼす影響についても、豊浦砂を用いて一部試験を行っている。行った試験ケースを表２－３，４に示す。

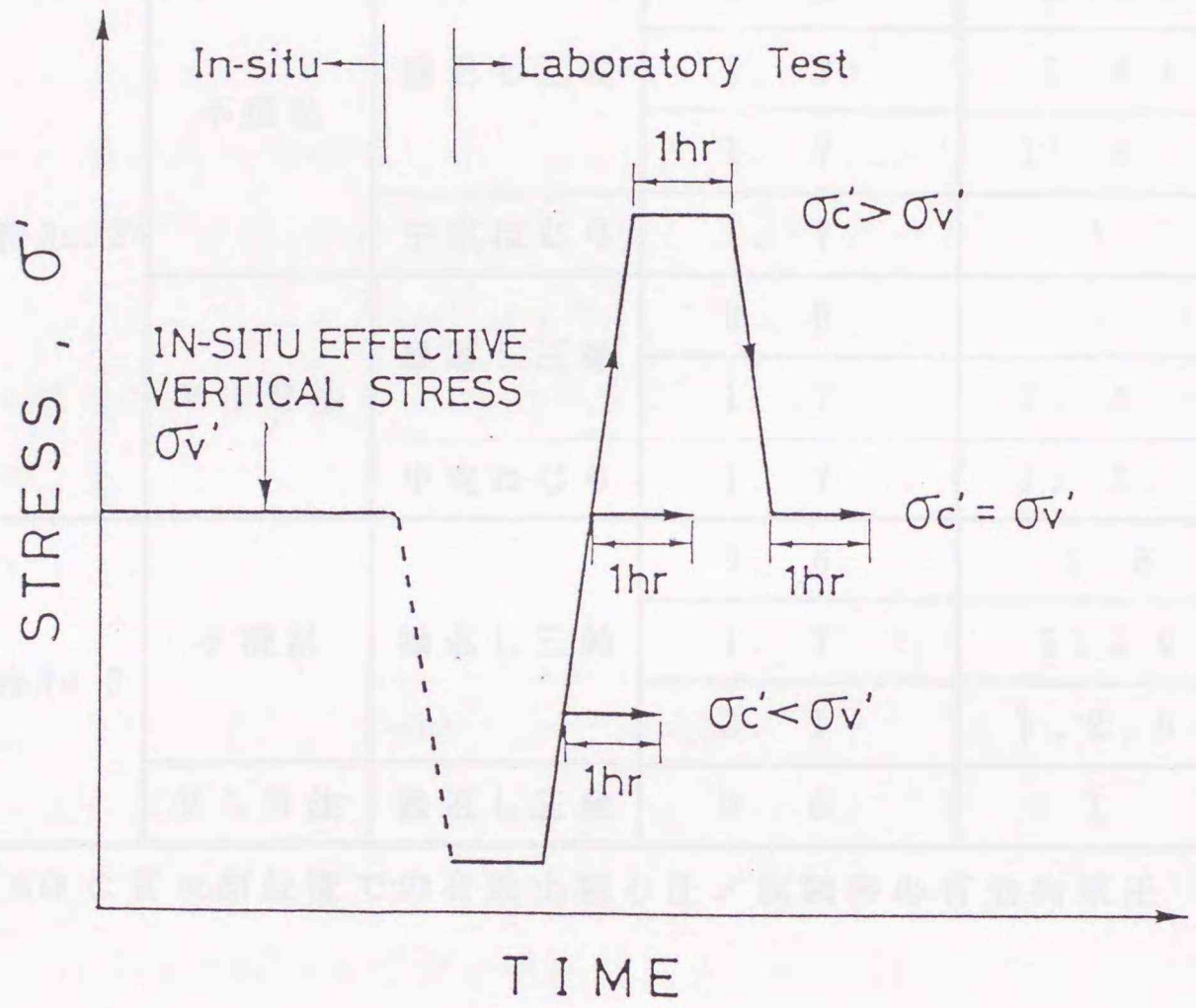


図２－10　過圧密履歴の方法

表２－３　試験ケース（液状化試験）

試料名	供試体	試験法	σc' kgf/cm²	過圧密比
石狩No.1	不攪乱	繰返し三軸	１．２５	1
		中空ねじり	１．２５	1
石狩No.2	不攪乱	繰返し三軸	０．６	２．８３ ＊
			１．３	１．３１ ＊
			１．７	１，２，４
		中空ねじり	１．７	1
	ＶＩＢ法	繰返し三軸	０．６	1
			１．７	１，２，４
		中空ねじり	１．７	１，２，４
石狩No.3	不攪乱	繰返し三軸	０．６	３．５ ＊
			１．７	１．２４ ＊
			２．１	１，２，３．８
	ＶＩＢ法	繰返し三軸	０．６	1

＊ＯＣＲ＝原位置での有効土被り圧／試験時の有効拘束圧

表２－４　試験ケース（繰返し変形試験）

試料名	供試体	試験法	載荷方法	Dr（%）	過圧密比
豊浦砂	ＶＩＢ法	三軸試験	排水	80，60	１，２，４
			非排水	80，60	１，２，４

２）異方圧密履歴

せん断履歴は液状化強度特性や繰返し変形特性に影響を及ぼすことが知られているが、供試体の構造によってその影響は変化しないものなのかを調べるために以下に示す経路で種々の異方圧密履歴を与えた。

ＣＫ（ＣＫＢ，ＣＫＣ，ＣＫＤ）－経路（Ｋ一定経路）

有効拘束圧$\sigma c'$＝０．１kgf/cm²（Ｂ．Ｐ．＝２．０kgf/cm²）である図２－11に示す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'＝０．５kgf/cm²，ＣＫＢ－経路）、Ｃ’点（p_c'＝１．０kgf/cm²，ＣＫＣ－経路）またはＤ’点（p_D'＝２．０kgf/cm²，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（$p_c'=\sigma c'$＝１．０kgf/cm²）で等方圧密を行う経路。なお、図中の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。

ＩＰ（ＩＰＢ，ＩＰＣ）－経路（ｐ一定経路）

Ａ点から等方状態のＢ点（p_B'＝０．５kgf/cm²，ＩＰＢ－経路）またはＣ点（p_c'＝１．０kgf/cm²，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圧密履歴を与え、三軸試験による液状化試験および繰返し変形試験を行った。ただし、ＣＫＣ経路の異方圧密履歴を与えた供試体に対しては中空ねじり試験による液状化試験と繰返し変形試験も実施している。

ここでＣＫ－経路は、砂地盤からブ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２－12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および繰返し変形特性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、平均主応力ｐ'で供試体に異方圧密履歴を与え試験を行っている。

一方、ＩＰ－経路は、応力経路の相違が液状化強度および変形特性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２－５，６に示している。

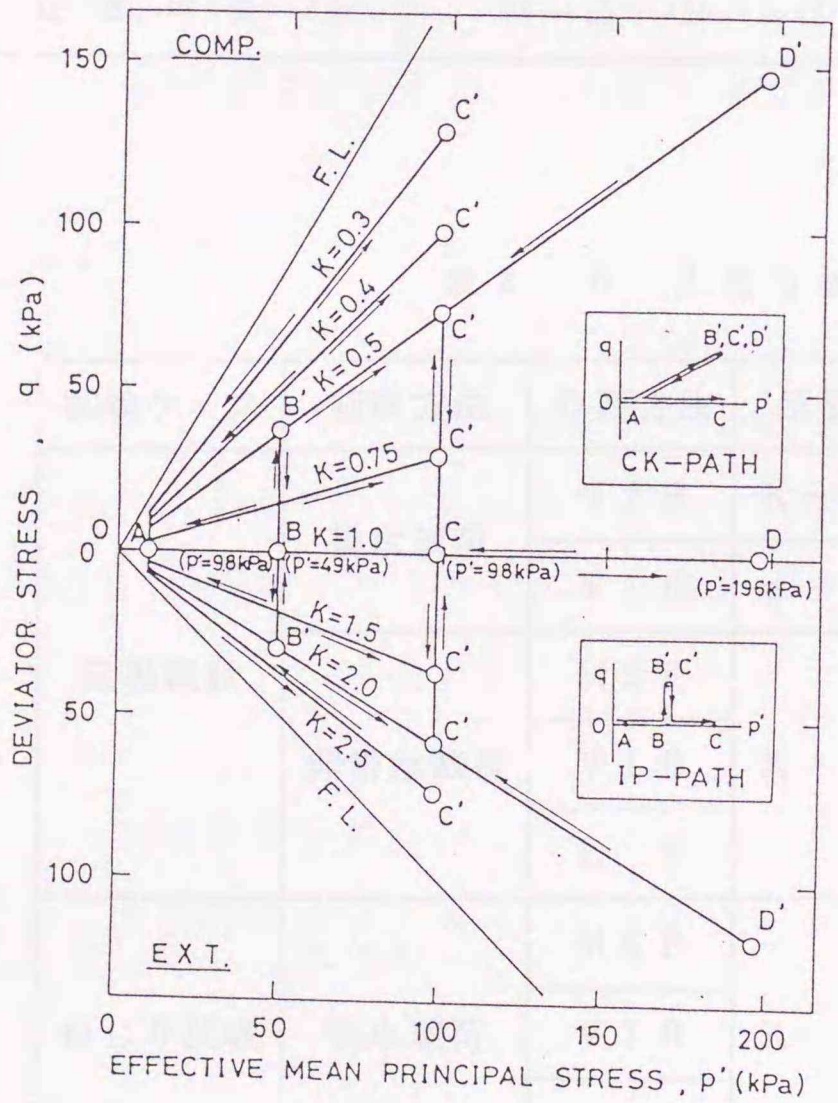


図２－11　異方圧密時の応力経路
（98kPa＝1.0kgf/cm²）

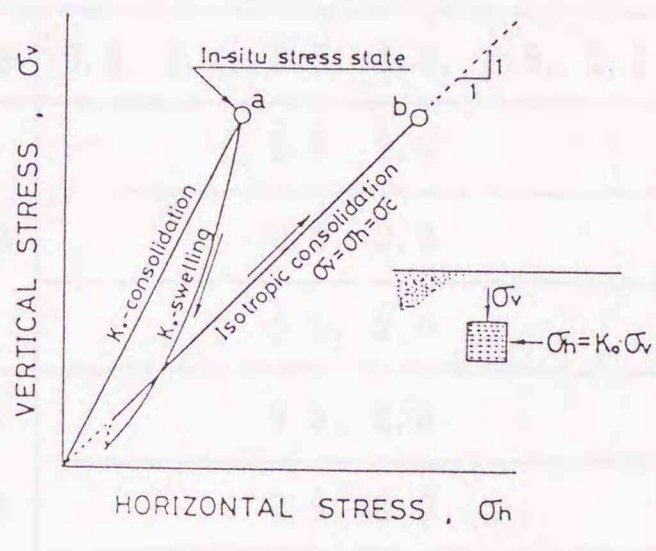


図２－12　サンプリング時の
応力変化の模式図

表2－5　圧密方法（液状化試験）

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
CK－経路	CKB－経路	O →A →B，B'→A →C	0.5，(1.0) 2.0
	CKC－経路	O →A →C，C'→A →C	0.3，0.4，0.5，0.75，(1.0)，1.5，2.0，2.5
	CKD－経路	O →A →D，D'→A →C	0.5，(1.0)，2.0
IP－経路	IPB－経路	O →A →B →B' →B →C	0.5，2.0
	IPC－経路	O →A →C →C' →C	0.5，2.0
圧密時間（分）		15 →15 →30 →15 →30	

表2－6　圧密方法（繰返し変形試験）

試験ケース	載荷方法	作製方法	圧密経路	圧密時の最大主応力比 K
三軸試験	排水載荷	VIB	K一定経路	0.4，0.5，2.0，2.5
		VIB	p一定経路	0.3，0.4，0.5，2.0，2.5，3.0
	非排水載荷	MSP	K一定経路	0.5，2.0
		VIB		0.5，2.0
		C E		0.5，2.0
ねじり試験	排水載荷	MSP	K一定経路	0.5，2.0
		VIB		0.5，2.0
		C E		0.5，2.0

２．５．２　液状化試験

所定の圧密が終了した後、振幅一定、載荷周波数ｆ＝０．１Ｈｚの正弦波の繰返し荷重（トルク）を供試体に与えた。試験結果は、繰返し非排水三軸試験では、繰返し軸応力比σd/2σc'と両振幅軸ひずみＤＡ=５％に達するまでの載荷回数Ｎcとの関係で、中空ねじり試験では繰返しせん断応力比τcy/σm'と両振幅せん断ひずみＤＡ＝７．５％に達するまでの載荷回数Ｎcとの関係で示している。

ここで、中空ねじり試験においては、供試体の形状が中空円筒であるため、中空供試体の断面においてせん断応力分布が均一ではない。また、せん断ひずみも供試体の内側と外側とで異なっている。

半径方向のせん断応力の分布については、供試体の物性に応じて図２－13の様な分布が考えられる。（ａ）は弾性的な場合で応力が半径に比例するケース、（ｃ）は剛塑性的な場合で一定の応力分布となるケースであるが、実際はその中間にあり（ｂ）の様な分布となっていると考えられる。これまでいろいろな研究者（例えばPradhanら，1988）が採用しているせん断応力の計算方法を挙げると次の３つである。

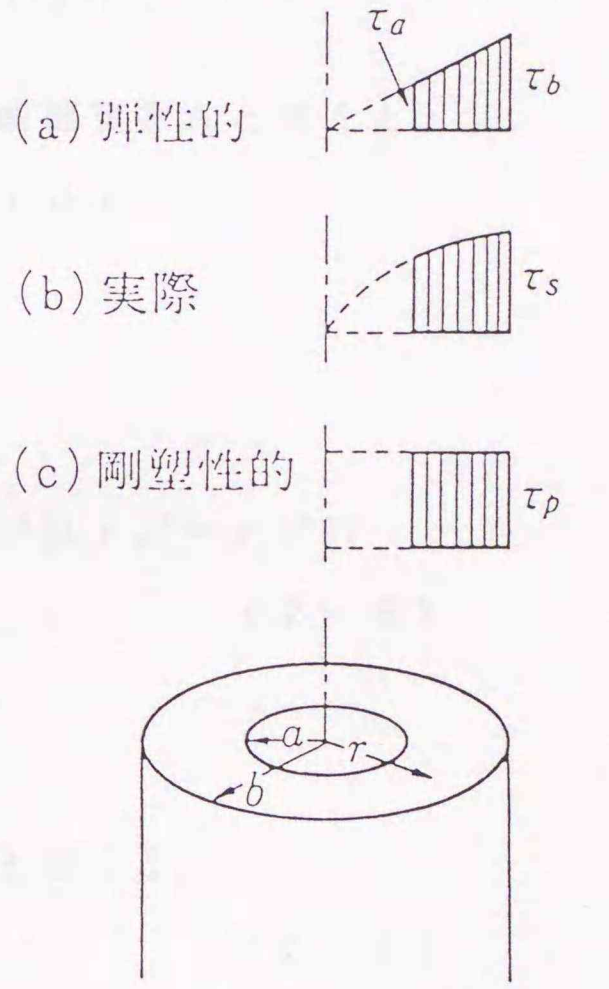


図２－13　せん断応力の分布（安田，1988）

Ｉ）供試体の物性が弾性的と仮定したときのせん断応力の半径方向の変化率をＫとおくと、半径ｒにおけるせん断応力τ_rは

$$\tau_r = K \cdot r \qquad (2-1)$$

と表される。

また、供試体に加わるトルクＴは、

$$T = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi r \cdot \tau_r r \, dr \qquad (2-2)$$

式（２－１）、（２－２）より、

$$T = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi r \cdot K r^2 \, dr$$

$$= 2\pi K [r^4 / 4]$$

$$T = \pi (r_o^4 - r_i^4) \cdot K / 2$$

$$\therefore K = 2T / \{ \pi (r_o^4 - r_i^4) \} \qquad (2-3)$$

平均半径 $r = (r_o + r_i) / 2$ の位置における平均せん断力 τ_1 は、

$$\tau_1 = K \cdot r$$

$$= 2T / \{ \pi (r_o^4 - r_i^4) \} \cdot \{ (r_o + r_i) / 2 \}$$

$$\therefore \tau_1 = T / \{ \pi \cdot (r_o^2 + r_i^2) \cdot (r_o - r_i) \} \qquad (2-4)$$

Ⅱ）また、面積の重み付き平均のせん断力 τ_2 は、断面積をＡとおくと、

$$\tau_2 = T / A = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi \tau_r r \, dr / \int_{r_i}^{r_o} 2\pi r \, dr$$

$$= \int_{r_i}^{r_o} K r^2 dr / \int_{r_i}^{r_o} r \, dr$$

$$= 2K (r_o^3 - r_i^3) / 3 (r_o^2 - r_i^2)$$

$$\therefore \tau_2 = 4 (r_o^3 - r_i^3) T / \{ 3\pi (r_o^2 - r_i^2)(r_o^4 - r_i^4) \} \qquad (2-5)$$

Ⅲ）供試体の物性が剛塑性体と仮定する場合

剛一完全塑性体の場合におけるせん断応力を τ_3 とおくと、

$$\tau_r = \tau_3 \qquad (2-6)$$

式（２－２）、（２－６）より、

$$T = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi \tau_3 r \, dr$$

$$= 2\pi \tau_3 [r^3 / 3]$$

$$T = 2\pi (r_o^3 - r_i^3) \tau_3 / 3$$

$$\therefore \tau_3 = 3T / 2\pi (r_o^3 - r_i^3) \qquad (2-7)$$

以上述べた３つの計算方法の中でどの方法が妥当であるかについては、ひずみが大きいほど τ_3 を用いるのが妥当であることが調べられている。液状化が生

じた場合には（Ⅲ）であることを考慮して液状化試験におけるせん断応力τとして、τ_3を用いた。

一方、せん断ひずみの定義に関しては以下のような２つの定義が考えられる。

Ⅰ）平均半径でのｒを用いる。

この場合のせん断ひずみγ_1は

$$\gamma_1 = \theta\ (r_o + r_i) / 2H \qquad (2-8)$$

Ⅱ）面積の重みつきせん断ひずみを用いる。

この場合半径ｒでのせん断ひずみをγ_rとすると

$$\gamma_2 = \int_{r_i}^{r_o} \gamma_r\, r\, dr \Big/ \int_{r_i}^{r_o} r\, dr$$

$$= \int_{r_i}^{r_o} (\theta\, r / H \cdot r)\, dr \Big/ \int_{r_i}^{r_o} r\, dr$$

$$\therefore \gamma_2 = 2\theta\ (r_o^3 - r_i^3) / \{3H\ (r_o^2 - r_i^2)\} \qquad (2-9)$$

本研究ではせん断ひずみγとしてγ_2を用いた。また、上記の各種のせん断応力とせん断ひずみを用いて液状化強度を比較したものが図２－14である。図から分かるようにほとんど差は生じていない。

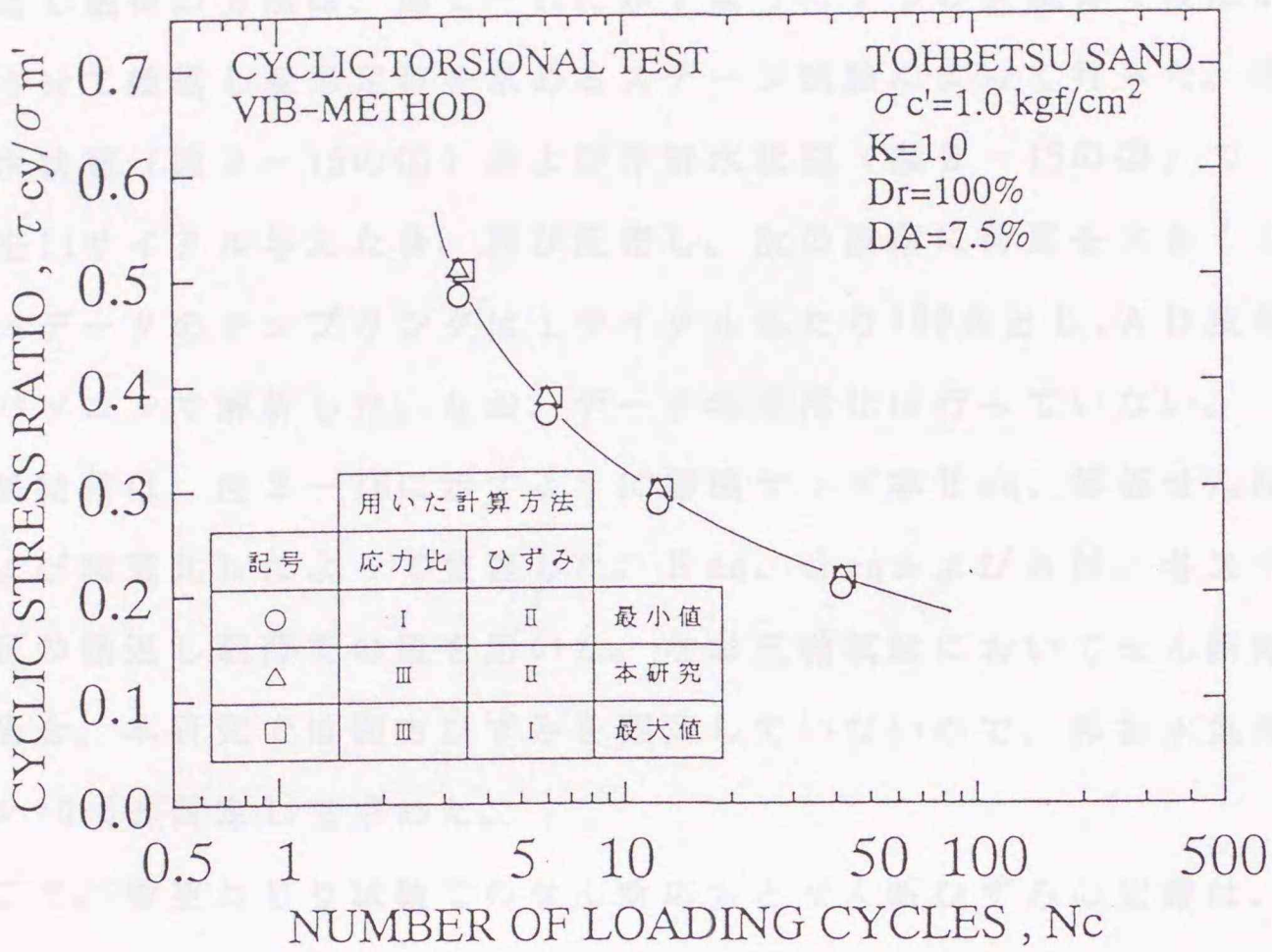


図２－14　異なる計算方法による液状化強度の比較

２．５．３　繰返し変形試験

繰返し載荷の方法は、図２－15に示すように１つの供試体で段階的に荷重を増幅させて繰返し変形定数を求めるステージ試験によって行った。繰返し載荷は排水状態（図２－15の①）および非排水状態（図２－15の②）で 0.1Hzの正弦波を11サイクル与えた後、再び圧密し、次の段階に荷重を大きくして行った。また、データのサンプリングは１サイクルあたり100点とし、ＡＤ変換したデータをパソコンで解析した。なお、データの平滑化は行っていない。

試験結果は、図２－16に示すように等価ヤング率Ｅeq、等価せん断剛性率Ｇeqおよび減衰比ｈによって整理した。Ｅeq、Ｇeqおよびｈは、各ステージの１０回目の繰返し載荷での値を用いた。なお三軸試験においてせん断剛性率を求める場合、本研究では側方ひずみを測定していないので、非排水条件でポアソン比ν=0.5と仮定して求めた。

ここで、中空ねじり試験でのせん断応力とせん断ひずみの定義は、微小なひずみレベルにおいては供試体はほぼ弾性的な挙動を示すと考えられるので、せん断応力として式（２－４）、せん断ひずみとして式（２－８）を用いた。比較のために図２－17に、液状化試験で採用した計算方法との比較を示す。

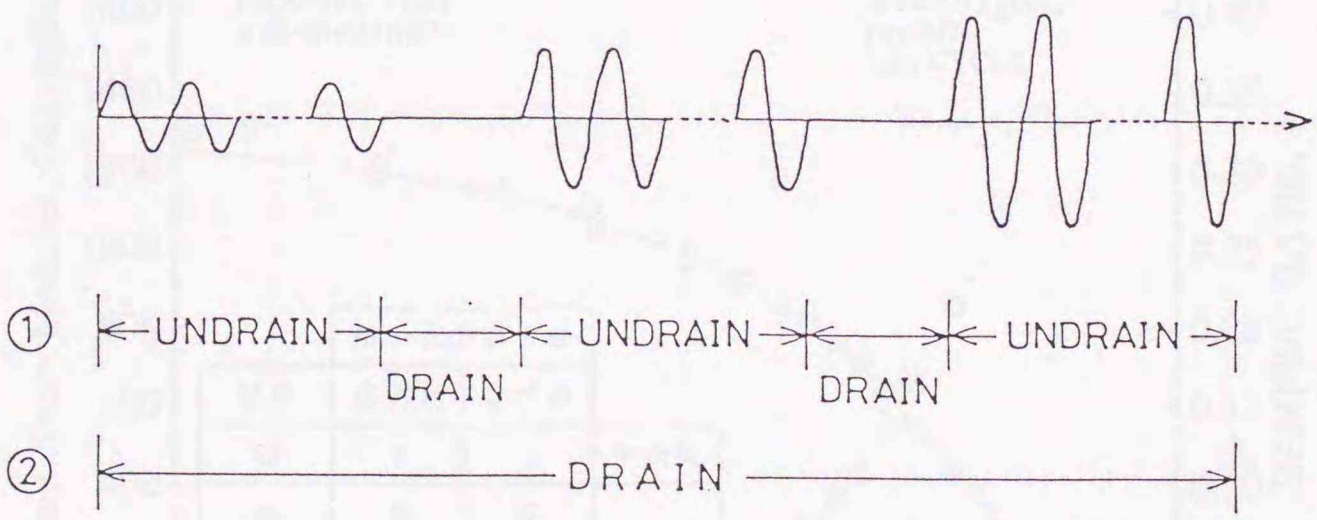
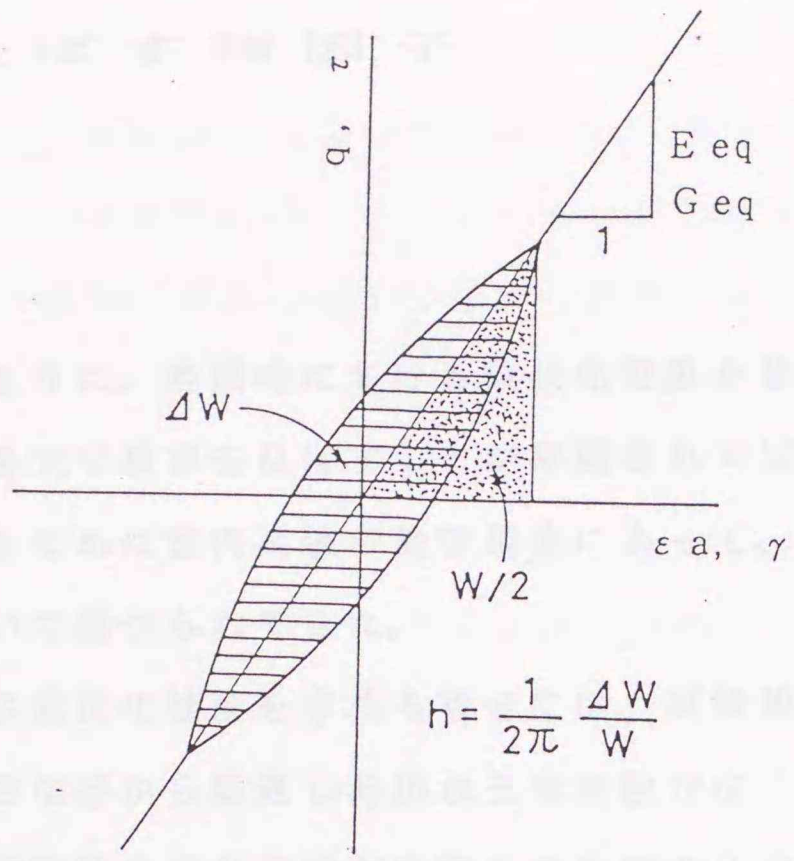


図２－15　繰返し載荷の方法



等価ヤング率：　　E_{eq}（kgf/cm²）＝ q ／（$\Delta \varepsilon_a$）$_{SA}$

等価せん断剛性率：　G_{eq}（kgf/cm²）＝ τ ／（$\Delta \gamma$）$_{SA}$

履歴減衰係数：　　h ＝（１／２π）・ΔW／W

図２－16　Eeq、Geqおよびｈの定義

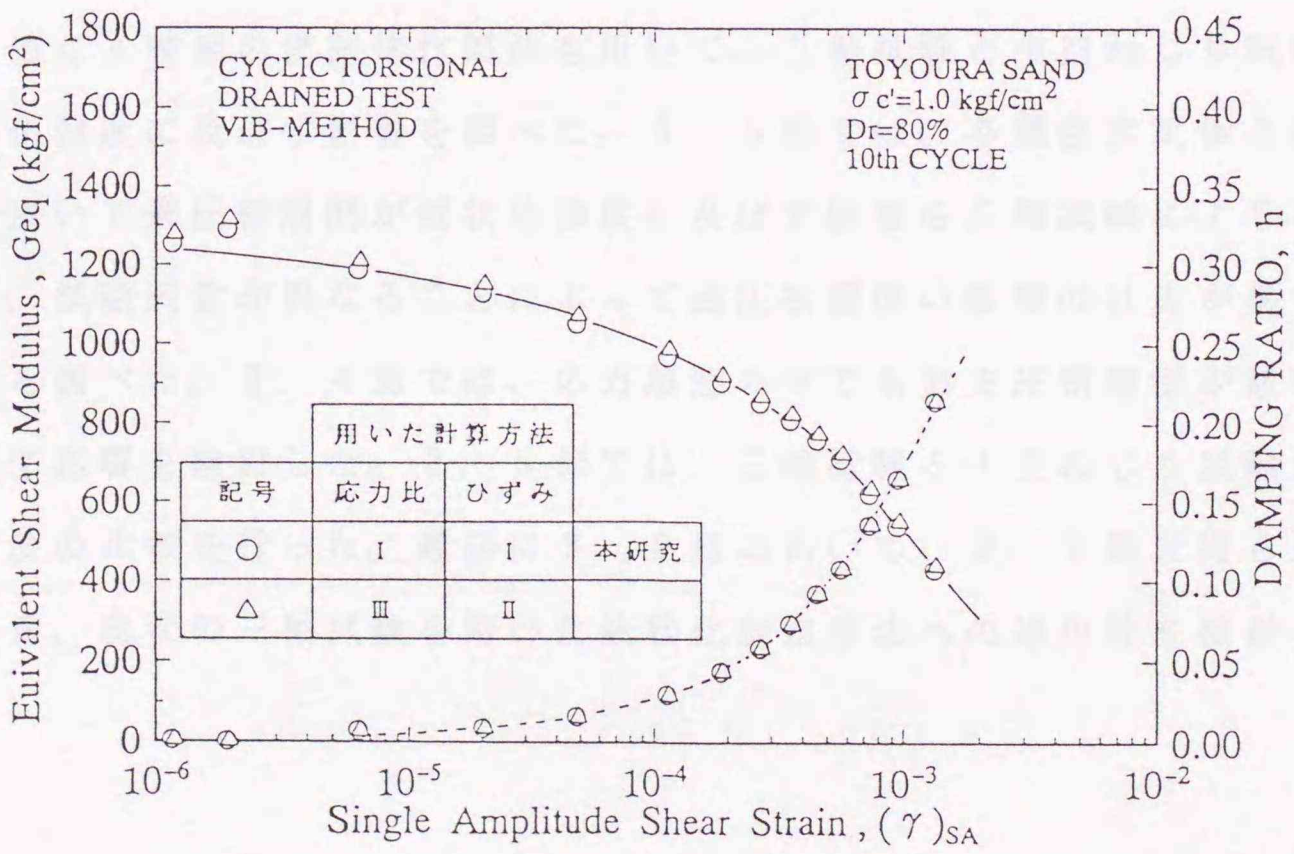


図２－17　異なる計算方法による動的変形定数の比較

第３章　液状化強度特性に影響を及ぼす諸因子

3.1　概　説

第１章でも述べたように、地震時における液状化現象が砂地盤を基礎とする構造物や土構造物に甚大な被害を及ぼすことが認識されて以来、液状化被害に対する対策を検討するために室内試験や被害調査によって、液状化の発生に影響を及ぼす因子について調べられてきた。

室内試験から地盤の液状化強度を求める場合には、試験装置の簡便さや不攪乱試料の採取しやすさなどから繰返し非排水三軸試験が広く用いられている。しかし、この試験は試験時の応力状態が実際の地震時の応力状態と異なる等不都合な点が多い。また、供試体が試験中に受ける応力履歴や飽和度（Ｂ値）の低下、メンブレンペネトレイションに代表されるシステムコンプライアンス等は、試験結果に大きく影響を及ぼすことが知られている。したがって、これら試験結果に及ぼす要因が的確に吟味され評価されていなければならない。

そこで、本章では、室内試験による液状化強度試験結果に及ぼす要因の中で、特に供試体の作製方法、応力履歴、試験方法の相違が液状化強度に及ぼす影響について調べた。３．２節では、供試体の構造特性が試験結果に及ぼす影響を調べるために４種類の供試体作製法を用いて、三軸試験と中空ねじり試験を行い、液状化強度に及ぼす影響を調べた。３．３節では、不攪乱供試体と再構成供試体を用いて過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を三軸試験により検討した。また、試験装置が異なることによって過圧密履歴の影響の仕方が異なるかについても調べた。３．４節では、応力履歴の中でも異方圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を検討した。３．５節では、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較を行った。最後に３．６節において、３．５節で得られた試験結果から、現状の三軸試験を用いた液状化判定方法への適用性を検討した。

３．２　供試体作製方法の影響

同じ試料を同じ方法で供試体を作製した場合には、密度が高くなれば液状化強度も高くなることは周知の事実である。しかし、同じ密度であってもその堆積の仕方、すなわち供試体の構造によって液状化強度が異なることが指摘されている（Mulilisら1977，三浦ら1982,1984，龍岡ら1986）。また、不攪乱試料を用いて三軸試験から液状化強度を求める場合、試料は地盤に対して鉛直方向から採取される。したがって、原地盤はその堆積状況によって異方的な構造を有しているため、同じ不攪乱試料であっても供試体を採取する方向によって得られる液状化強度が異なることが考えられる。

そこで、本節では三軸試験装置と中空ねじり試験装置を用いて、数種の供試体作製方法により構造の異なる供試体を作製し、液状化強度に及ぼす初期異方性の影響を調べた。また、三軸試験では室内で作製した凍結ブロック試料から供試体の切り出し方向を変えた試験も行っている。

用いた供試体作製方法と試験ケースを表３－１に示す。

表３－１　供試体作製方法と試験ケース

供試体 作製方法	豊浦砂		当別砂		相馬砂	
	三軸	ねじり	三軸	ねじり	三軸	ねじり
ＭＳＰ法	○	○	－	－	－	－
Ｓ－ＭＳＰ法 （R_BＶ，Ｄ，Ｈ）	○	－	－	－	－	－
ＶＩＢ法	○	○	○	○	○	○
Ｃ　Ｅ法	○	○	○	○	○	○

３．２．１　三軸試験

１）供試体の切り出し方向の影響

ここでは、供試体作製方法は同じであるが、試験時の繰返し載荷の方向と堆積面との角度の相違が異なる場合の液状化強度の相違を調べるために、Ｓ－ＭＳＰ法で作製した凍結したブロック試料から切り出し方向を鉛直（R_BV供試体）、４５°（R_BD供試体）、水平（R_BH供試体）の３種類方向から供試体を作製し、その液状化強度を比較した。用いた試料は豊浦砂である。

図３－１は、両振幅軸ひずみＤＡ＝５％を生ずる時の繰返し応力比$\sigma d/2\sigma c'$と載荷回数Ｎｃとの関係をR_BV、R_BD、R_BH供試体について示したものである。図から分かるように、鉛直方向から切り出したR_BV供試体の液状化強度は、R_BD、R_BH供試体よりも確実に低い値を示している。このように、供試体の作製方法が同じでも、供試体に加わる応力の方向と堆積面との角度が異なることによって得られる液状化強度が異なることが分かる。

図３－２～４には、それぞれ供試体の繰返し載荷時の典型的な有効応力経路とタイムヒストリーを示している。図より、R_BV供試体では、繰返し載荷過程において、伸張応力条件下で卓越した間隙水圧および軸ひずみの発生が見られ、逆にR_BH供試体では、圧縮応力条件下で間隙水圧および軸ひずみの発生が卓越している。また、R_BD供試体は、圧縮および伸張応力条件下で同程度の間隙水圧および軸ひずみの発生が認められる。すなわち、載荷方向と堆積面との違いにより、間隙水圧発生特性および変形特性がそれぞれ異なっている。

ここで、繰返し載荷時の変形特性と液状化強度の関係に着目してみると、伸張方向での変形量および間隙水圧の発生量が卓越しているR_BV供試体の液状化強度が最も低くなっている。非排水繰返し三軸試験は、側圧一定のもとで振幅一定の軸荷重のみを増減させて繰返し応力を供試体に与えるため、両載荷時における平均主応力および供試体断面積の変化量が異なる。そのため、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、その破壊が伸張応力に大きく支配される試験となる。したがって、得られる液状化強度は三軸伸張条件下での供試体の変形特性に非常に敏感であると考えられる。このことから、R_BV供試体は繰返し載荷時の伸張応力条件下で発生する間隙水圧および変形量が圧縮条件下よりも、はるかに大きいため、他の供試体に比べて

液状化強度が低くなったと推定できる。それに対し、ＲＢＤ、ＲＢＨ供試体では、ともに三軸伸張条件下での変形量が、ＲＢＶ供試体ほど卓越していないため、ＲＢＶ供試体よりも液状化強度が高くなっている。

一般に、原位置からサンプリングした不攪乱試料を用いて液状化強度を評価する場合、試料は本試験における鉛直方向に切り出した供試体に相当するものと考えられる。したがって、実際の地盤の堆積構造がＳ－ＭＳＰ法で得られた構造と同じであると考えた場合、通常の鉛直方向から採取した供試体での液状化強度は地盤の液状化強度を過小に評価する恐れがあることを示している。

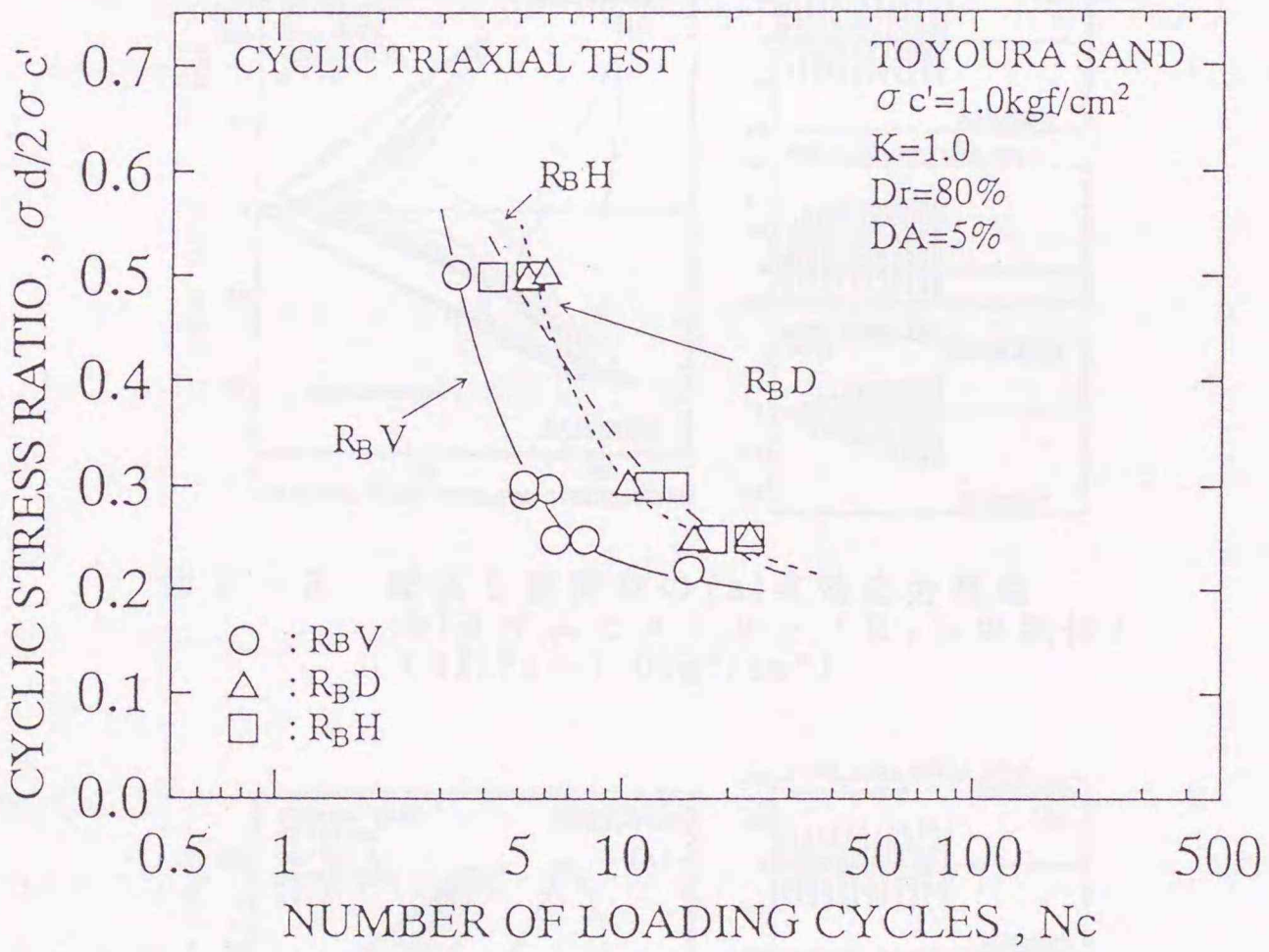


図３－１　液状化強度に及ぼす供試体作製方法の影響
（ＲＢＶ，ＲＢＤ，ＲＢＨ供試体）

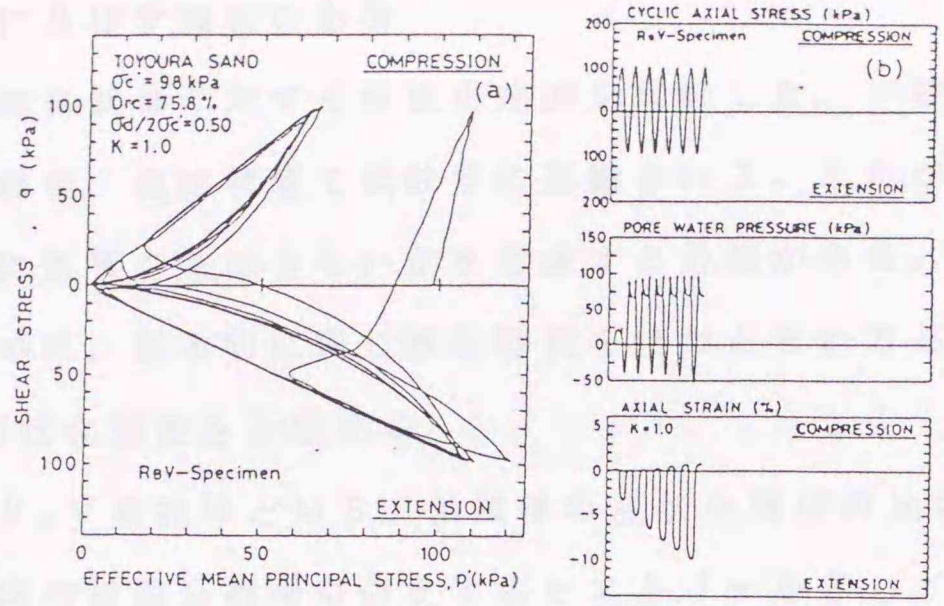


図３－２　繰返し載荷時の(a)有効応力経路
(b)タイムヒストリー（R_BV供試体）
（98kPa＝1.0kgf/cm²）

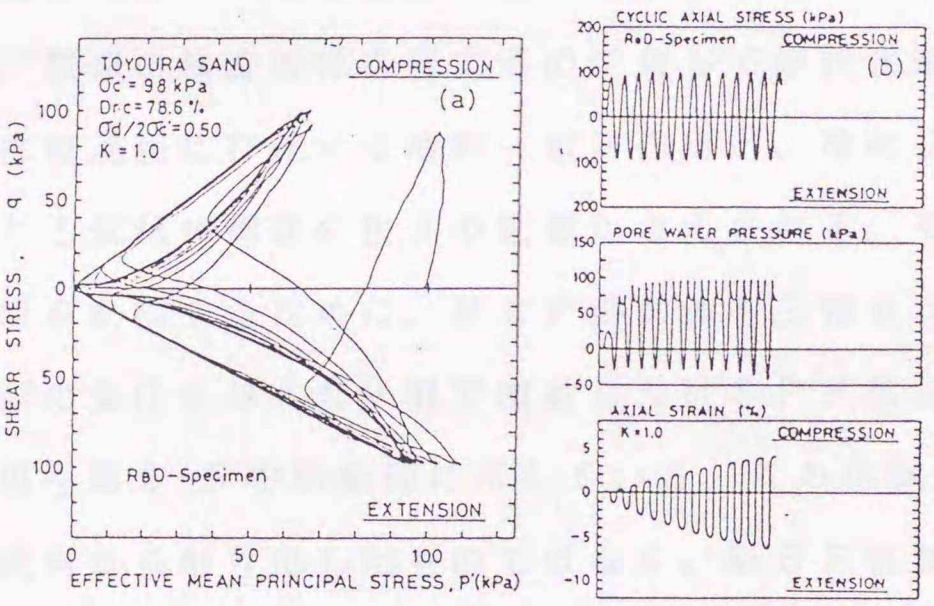


図３－３　繰返し載荷時の(a)有効応力経路
(b)タイムヒストリー（R_BD供試体）
（98kPa＝1.0kgf/cm²）

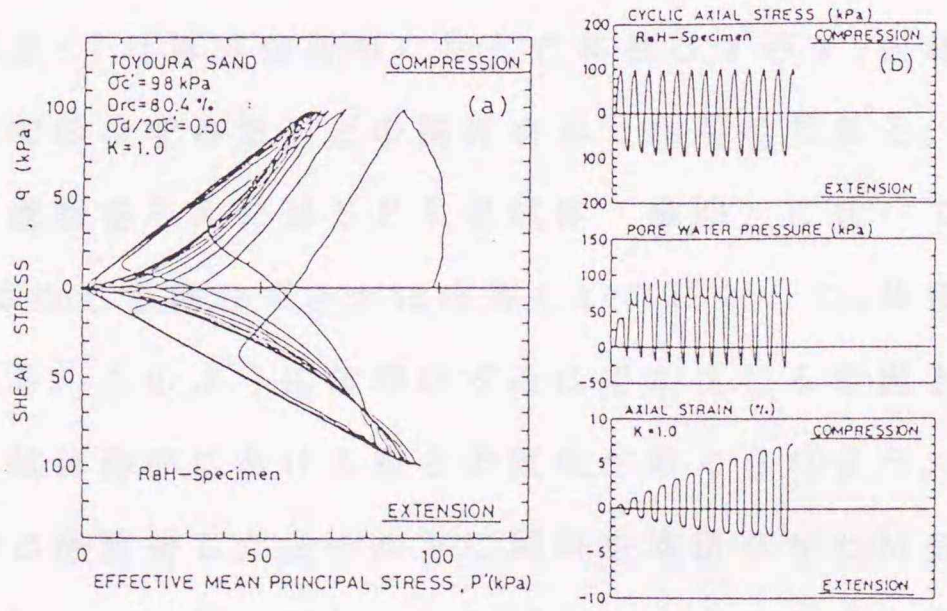


図３－４　繰返し載荷時の(a)有効応力経路
(b)タイムヒストリー（R_BH供試体）
（98kPa＝1.0kgf/cm²）

２）液状化強度に及ぼす凍結の影響

上記では、凍結供試体に対する液状化強度を比較した。一般に原位置からの不攪乱試料は採取後、凍結状態で試験室に運搬される。したがって、この凍結作用が試験結果に影響を及ぼさないかを考慮する必要がある。そこで、凍結の影響を調べるために、基本的に同じ構造特性を持つと思われるＭＳＰ供試体とＲ$_B$Ｖ供試体の液状化強度を比較する。

図３－５にはＲ$_B$Ｖ供試体とＭＳＰ供試体の液状化強度の比較を、図３-６には、ＭＳＰ供試体の繰返し載荷時のタイムヒストリーを示している。図より、Ｒ$_B$Ｖ供試体の方が液状化強度が確実に高くなっている。また、図３-２および図３－６に示したＲ$_B$Ｖ供試体とＭＳＰ供試体のタイムヒストリーから、両供試体はともに伸張応力条件下で間隙水圧および変形が卓越する類似な供試体であることが分かる。類似の構造特性を有するのに対して液状化強度が異なる原因として、供試体作製過程に存在する凍結－融解作用と、凍結供試体を成形することによって生じる供試体側面の粗さの影響が考えられる。そこで、凍結－融解作用の影響を明らかにするために、ＭＳＰ供試体を三軸セル内で飽和後脱水し、０．１kgf/cm^{2}の負圧を与えた状態で凍結したＭＳＰＦ供試体を用いて試験を行って得た結果を図３-５中の●印に示している。この供試体はＲ$_B$Ｖ供試体と異なり、凍結試料から削り出したものではなく、ＭＳＰ供試体に凍結－融解作用のみを与えた供試体である。この比較から凍結－融解作用は、本質的に液状化強度に影響を及ぼす因子ではないことが分かる。

したがって、ＭＳＰ供試体とＲ$_B$Ｖ供試体の強度差の原因として、次のことが考えられる。図３-７は等方除荷時に生じた体積ひずみε$_v$と軸ひずみε$_a$（図２－11中のC→A間でのひずみ量）との関係を示したものである。ＭＳＰ供試体および凍結－融解過程を与えたＭＳＰＦ供試体（●印）に比べて、Ｒ$_B$Ｖ、Ｒ$_B$Ｄ、Ｒ$_B$Ｈ供試体では生じる軸ひずみがほぼ等しいのに対して、体積ひずみは著しく大きくなっている。このように体積ひずみに差が生じる原因として、図３－８に示すような供試体側面における粗さの変化が考えられよう。すなわち、メンブレンをあらかじめ装着したモールドに試料を堆積させたＭＳＰ供試体の周面での粒子の状態①と、凍結供試体を削り出した時に生じる状態②を比較してみると、例えばハッチングを施した粒子の剥落が生じるなどのため、ＭＳＰ供試

体と粒径が等しい試料を用いたとしても、トリミングを伴って作製した供試体の側面においては、あたかも粒径の大きな試料に対して試験を行っているのと同じことになると思われる。したがって、圧密時のメンブレン貫入量がＭＳＰ供試体よりもはるかに大きくなるため、図３－７に示した体積ひずみの差が生じたものであろう。写真３-１にはＲ$_B$Ｖ供試体とＭＳＰＦ供試体の表面部分を示しているが、明らかにＲ$_B$Ｖ供試体の表面部分はＭＳＰＦ供試体よりも粗くなっている。

ところで、田中ら（1988）は液状化試験に及ぼすメンブレン貫入の影響を簡便に予測する方法を提案している。図３－９に示すように、繰返し回数が多い試験における間隙水圧の時刻歴の中央部分についてはほぼ弾性的挙動をしていると考え、その時の軸方向応力の変化⊿σ$_a$と間隙水圧の増分⊿ｕの関係から、以下に示すメンブレンコンプライアンス比Ｃ$_{RM}$を求めている。

$$C_{RM} = \frac{B}{3D} - 1 \qquad (3-1)$$

（Ｂ：間隙水圧係数、Ｄ＝⊿ｕ／⊿σ$_a$）

（３－１）式から、メンブレン貫入の影響が大きくなると、同じ軸方向応力の変化に対して発生する間隙水圧増分が少なくなるため、Ｃ$_{RM}$の値が大きくなることになる。図３－10は、Ｃ$_{RM}$の値をＭＳＰおよびＳ－ＭＳＰ供試体に対して本研究で行った試験について求めたものである。ＭＳＰ供試体に比べ表面の成形を行ったＲ$_B$-供試体の方がはるかにＣ$_{RM}$の値は大きくなっており、供試体表面を削り出すことによってメンブレン貫入の影響が増大することが分かる。

したがって、繰返し載荷時のメンブレンコンプライアンスの増大によって間隙水圧の発生が抑制されることにより、Ｒ$_B$Ｖ供試体は、ＭＳＰ供試体よりも高い液状化強度を示したものと考えられる。

このことは、供試体表面の成形による表面の乱れは、新たなメンブレン貫入を誘発することになることを示している。したがって、原位置からサンプリングした試料に凍結作用を与えて試験を行う場合等、供試体表面を直ナイフ等で成形すると液状化強度を過大評価することになってしまい、試験結果に対して何らかの補正を行わなければならないことになる。

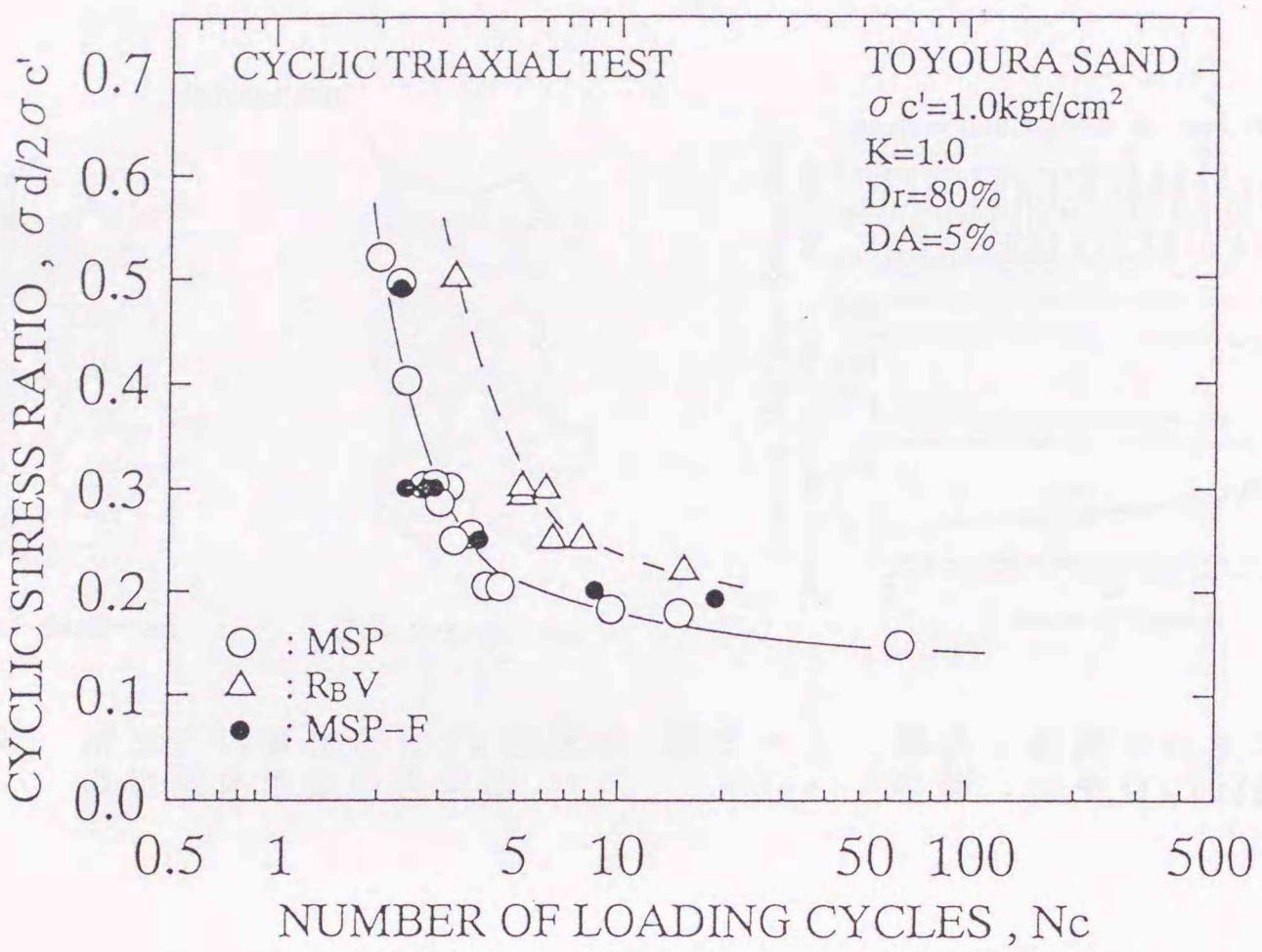


図 3 － 5　液状化強度に及ぼす凍結の影響
（ＲＢＶ，ＭＳＰ，ＭＳＰＦ供試体）

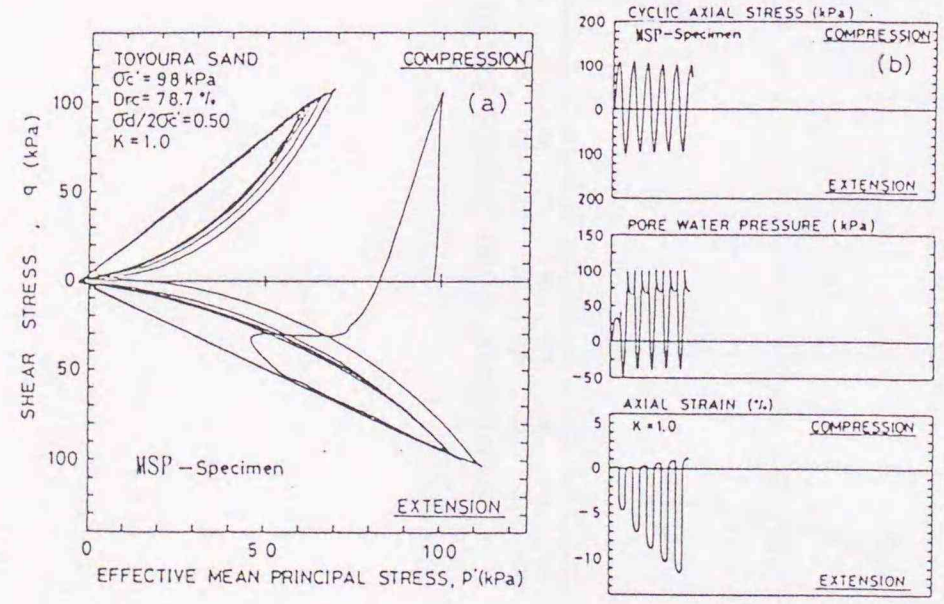


図 3 － 6　繰返し載荷時の(a)有効応力経路
(b)タイムヒストリー（ＭＳＰ供試体）

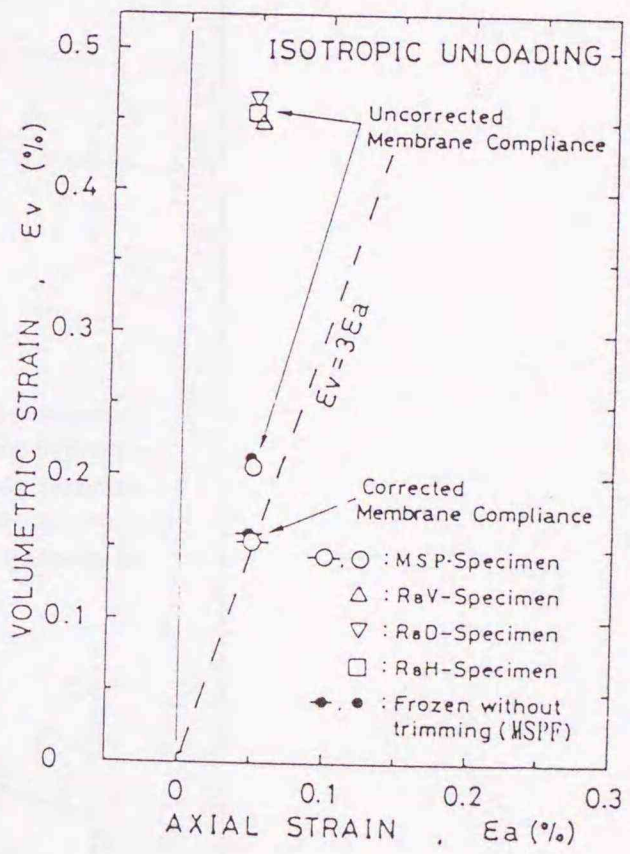


図 3 － 7　等方除荷時の体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a との関係

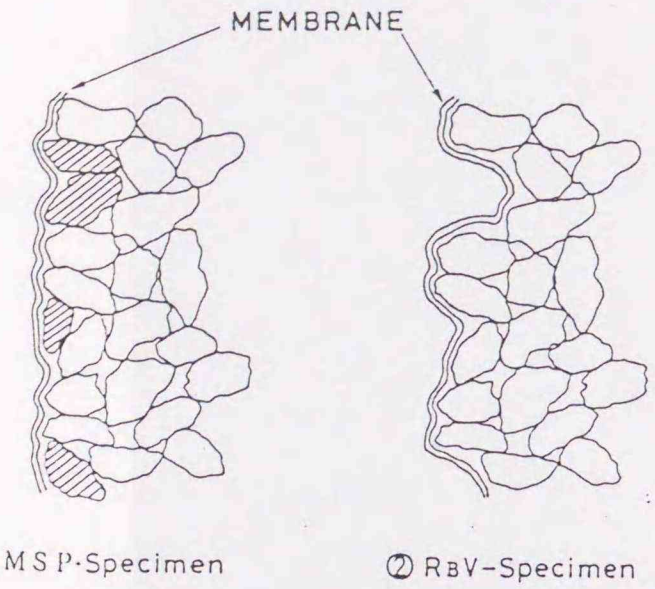


図３－８　ＭＳＰ供試体とＲＢＶ供試体の供試体表面の模式図

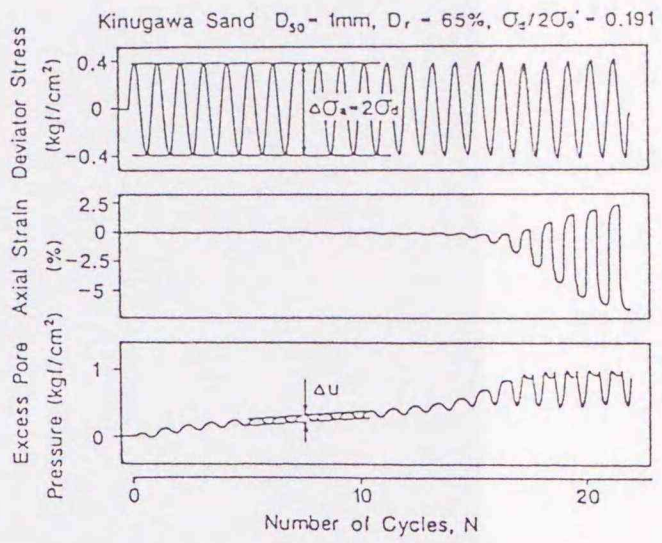


図３－９　繰返し載荷時のタイムヒストリーの例（田中ら，1988）

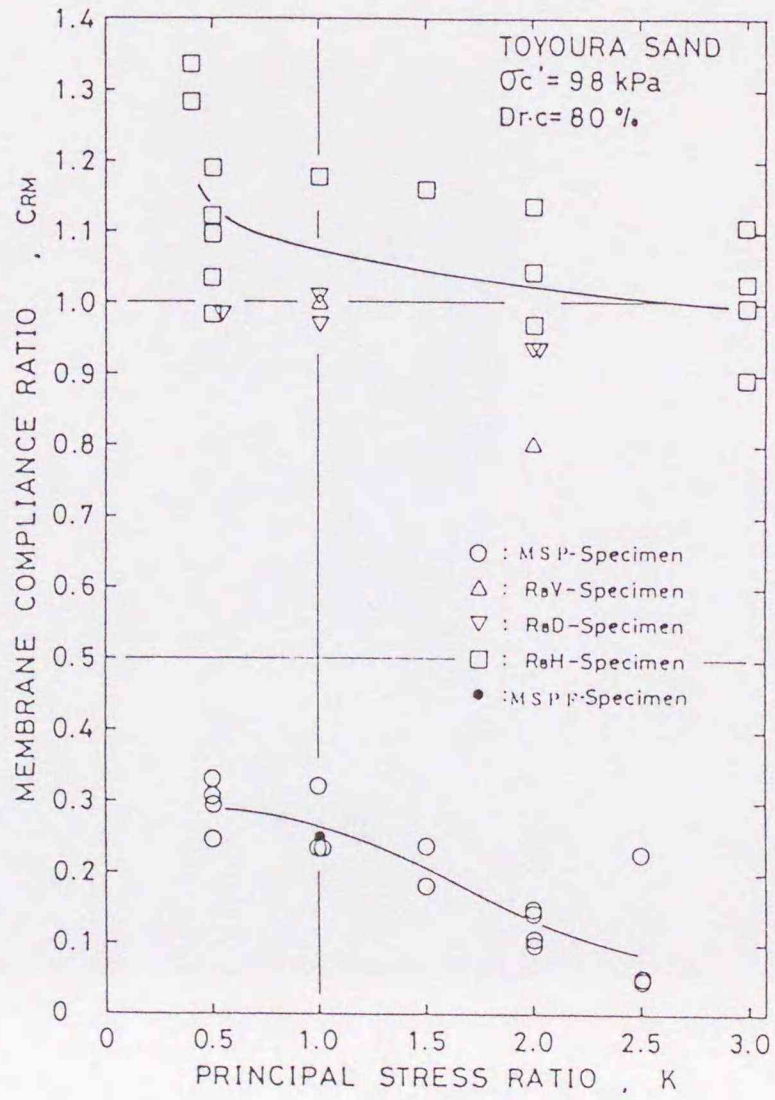
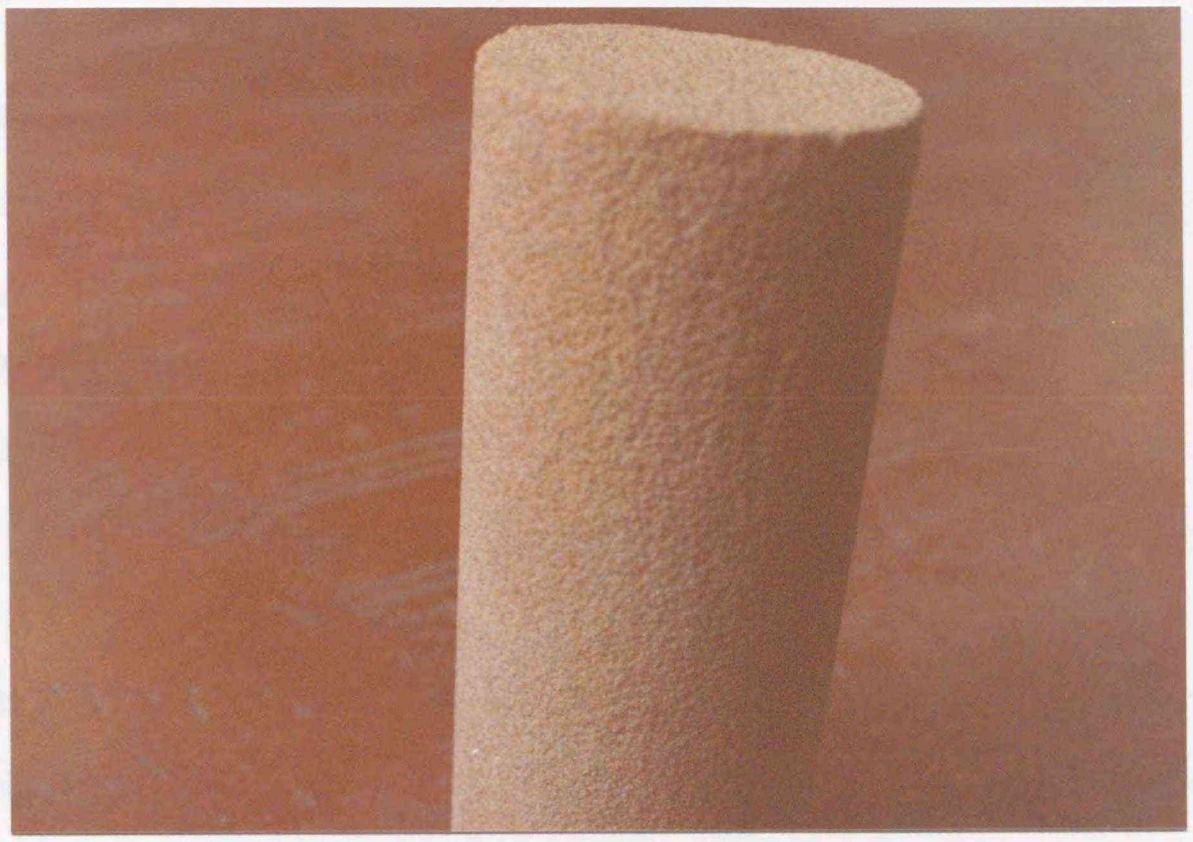
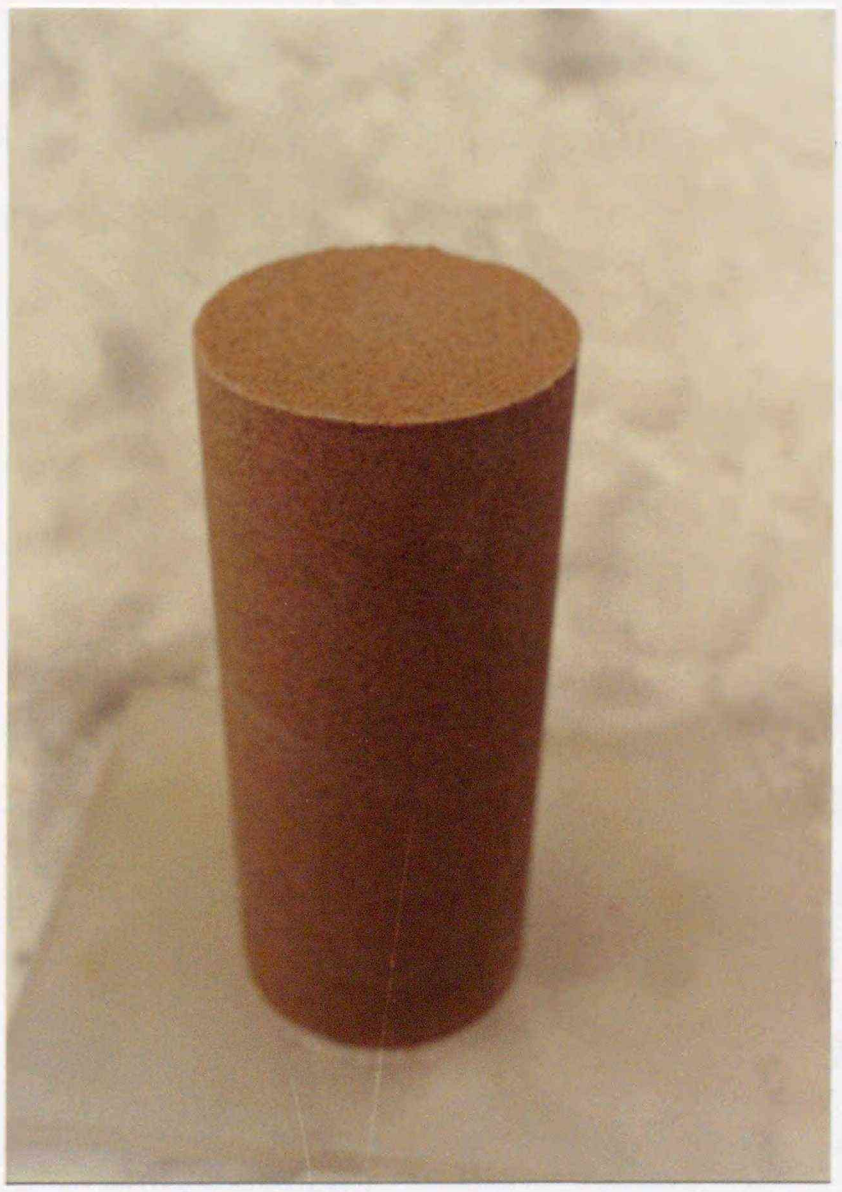


図３－10　メンブレンコンプライアンス比 C_{RM} と圧密時の主応力比Ｋとの関係



（ａ）



（ｂ）

写真３－１　供試体表面の状況(a)R_BＶ供試体(b)ＭＳＰ.Ｆ供試体

３）供試体作製方法の影響

これまでは、供試体の作製方法は同じであるが、切り出し角度を変えることによって繰返し載荷の方向と堆積方向が異なる供試体に対する比較を行った。次に、異なる供試体作製方法を用いて構造の異なる供試体を作製した場合の三軸試験による液状化強度の比較を行う。用いた試料は、豊浦砂、当別砂、相馬砂の３種類である。比較する供試体作製方法は、先に示したＭＳＰ法とＶＩＢ、ＣＥ法である。ここで、ＣＥ法による供試体は中空円筒形の供試体しか作製することができないため、供試体形状の違いによる液状化強度の差を取り除くために、全て中空供試体を用いた液状化強度の比較を行った。また、ＣＥ供試体は凍結供試体であるため、先に示したように供試体の成形の際の表面の粗さの影響が考えられる。しかし、ＣＥ供試体の成形は中空供試体の内空部分のみであり、表面積の多くの部分を占める供試体側面は成形していないので、液状化強度に及ぼす成形の影響は少ないと考えられる。

図３－11は、ＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法による液状化強度を比較したものである（当別砂と相馬砂はＶＩＢ，ＣＥ法）。図から、豊浦砂においては、ＭＳＰ供試体の液状化強度が最も低く、ＶＩＢ供試体は中間で、ＣＥ供試体が最も高くなっている。豊浦砂と同様に当別砂と相馬砂においてもＣＥ供試体はＶＩＢ供試体よりも僅かに強度が高い。先に示したＳ－ＭＳＰ供試体と同様に繰返し載荷時の軸変形特性と間隙水圧発生特性を豊浦砂供試体について比較すると図３－１２，１３に示すようになる。軸ひずみを比較すると供試体の作製方法によってその特性が大きく異なり、ＭＳＰ供試体は繰返し載荷時に圧縮側に全く変形せず伸張側のみに変形している。それに対しＣＥ供試体は圧縮側での変形量の方が伸張側よりも大きくなっている。また、有効応力経路を比較しても繰返し載荷の第１サイクルにおける間隙水圧は、ＭＳＰ供試体に比べＣＥ供試体では伸張時の間隙水圧の発生量が卓越している。

このような、変形特性の相違は液状化強度とも密接に関係しており伸張側での変形および間隙水圧の発生量が卓越する供試体ほど液状化強度が低くなっている。この傾向はＳ－ＭＳＰ供試体におけるそれと同様である。

このように供試体作製方法によって変形特性が異なるのは、先に示したように繰返し三軸試験は試験時の最大主応力方向が鉛直方向と水平方向に９０°交

番する試験であるため、供試体の構造特性の相違によって圧縮方向と伸張方向とでの変形特性が変化するためである。この変形特性と液状化強度の関係を比較すると、繰返し載荷時に圧縮側よりも伸張側での変形量が卓越するＭＳＰ供試体は、液状化強度が低く、圧縮側の変形量の方が大きいＣＥ供試体では、液状化強度が高くなっている。

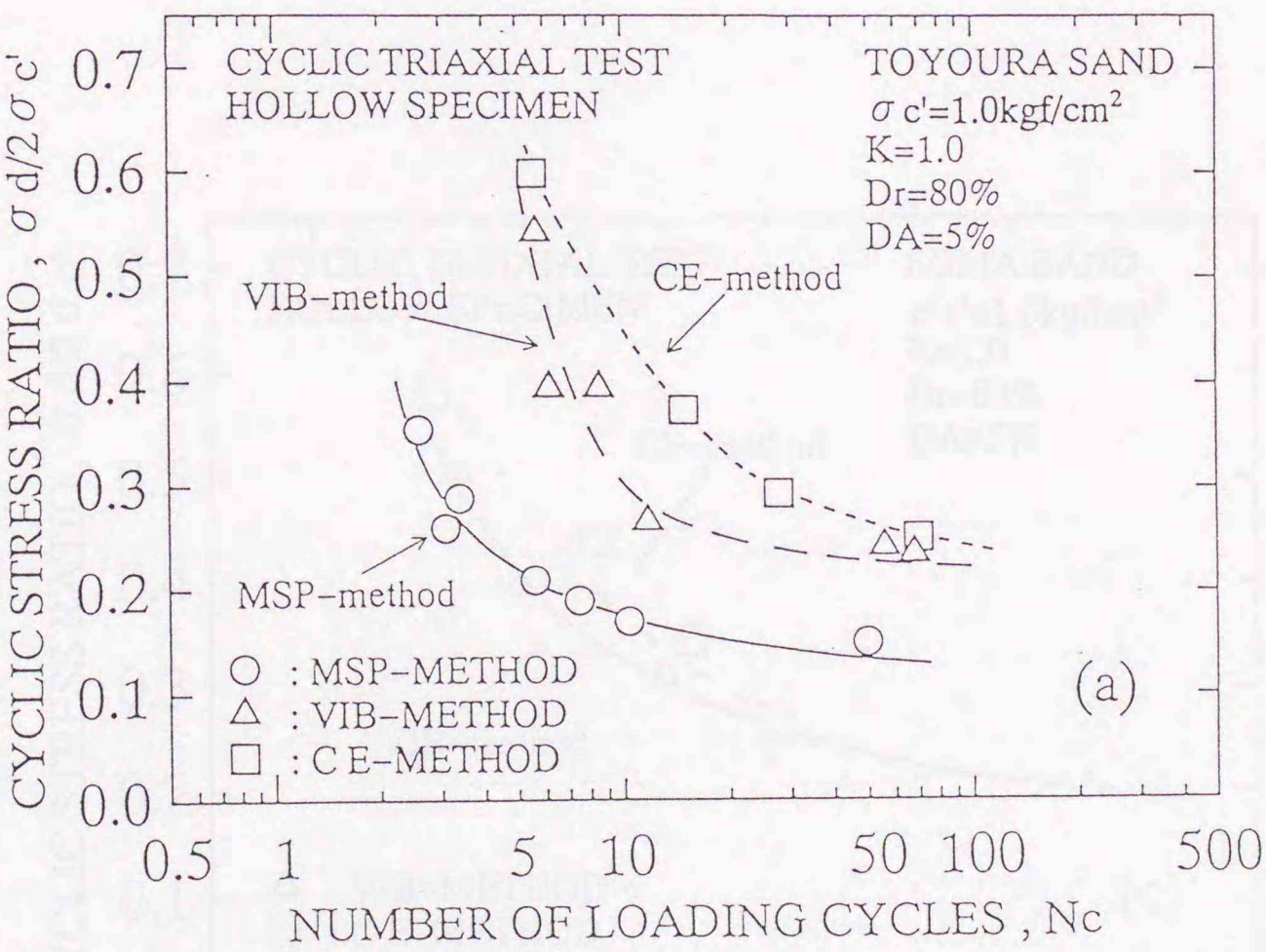
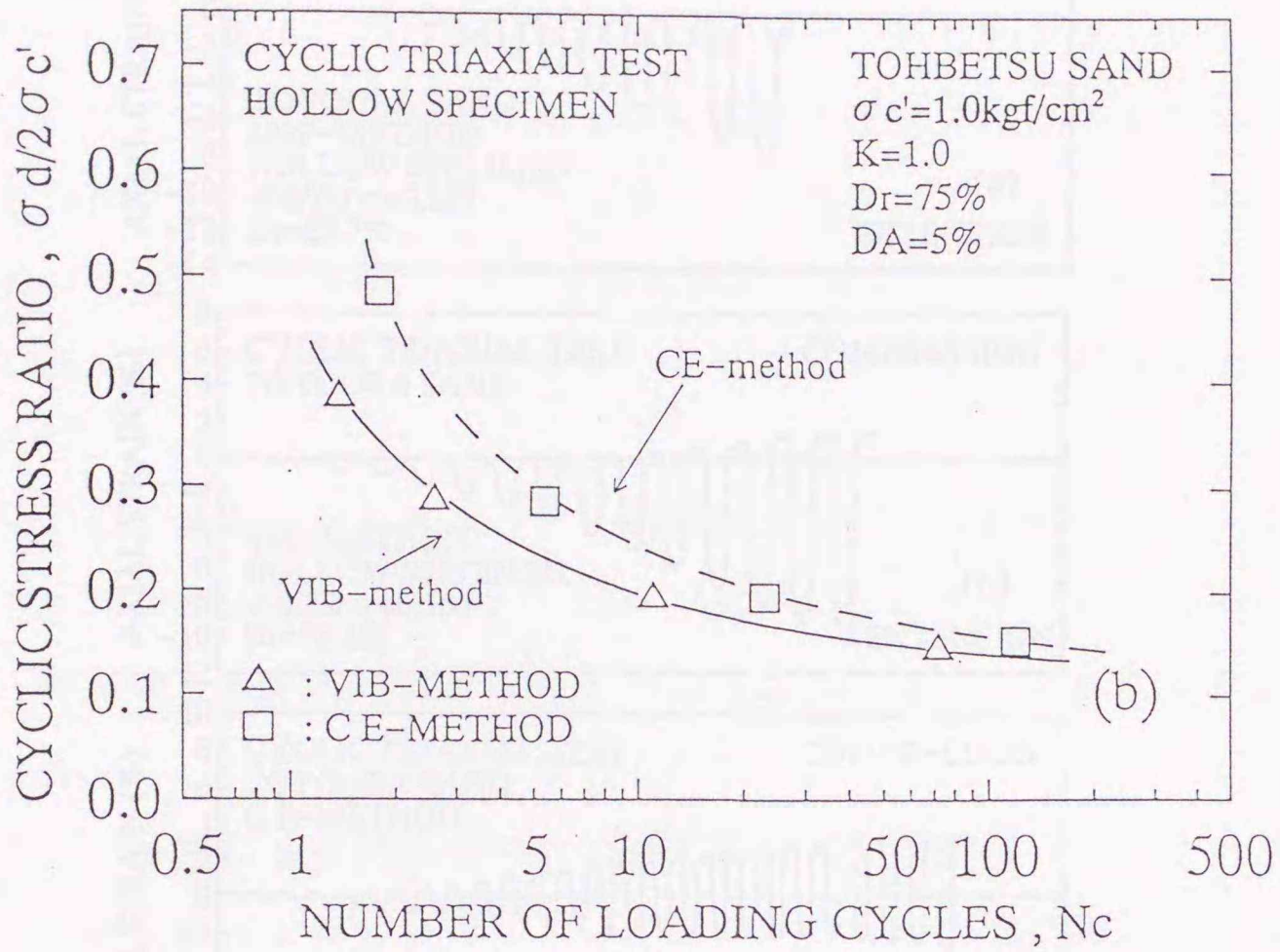


図３－11　三軸試験による液状化強度に及ぼす供試体作製方法の影響
(a)豊浦砂



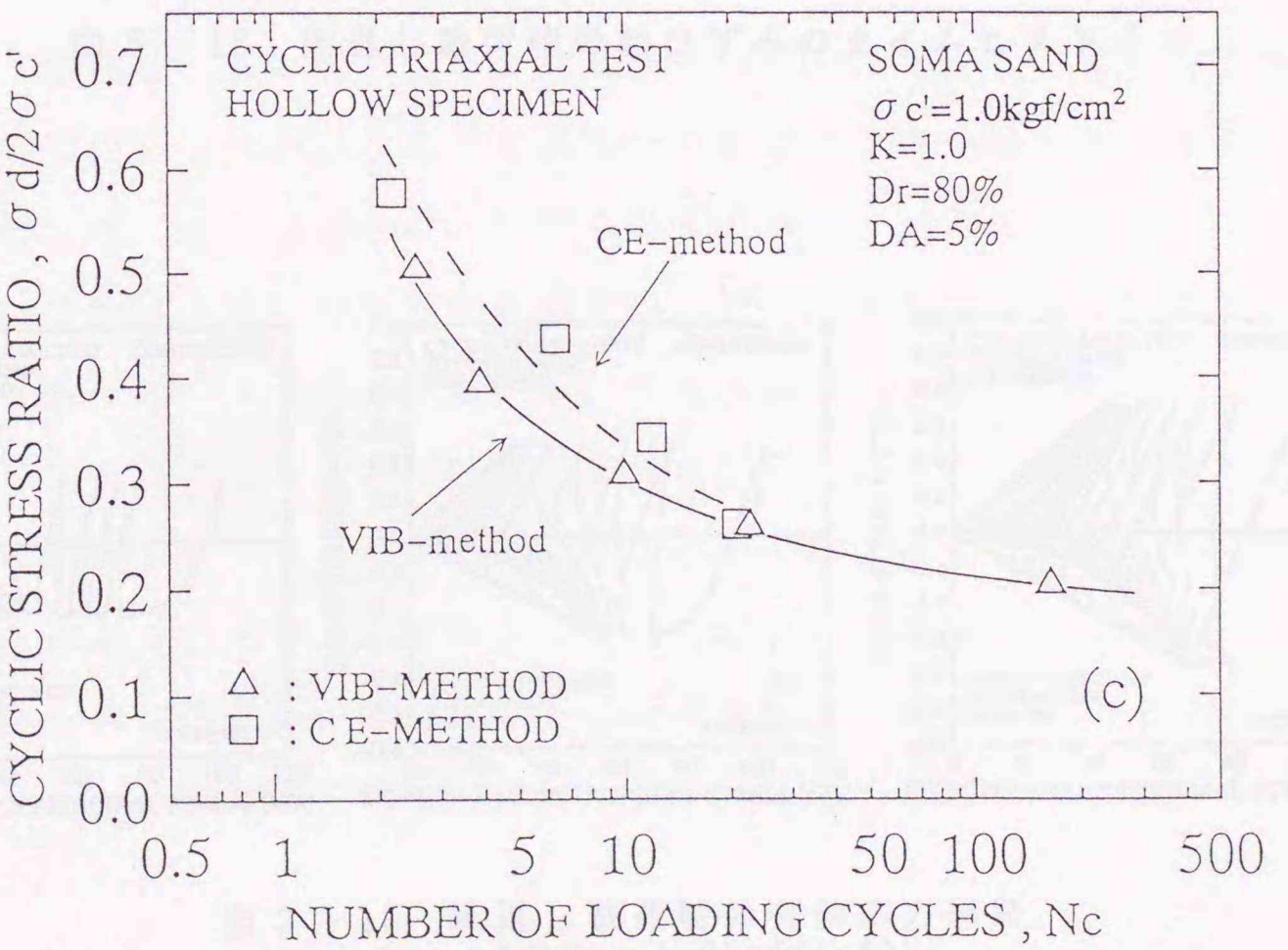


図 3 － 11　三軸試験による液状化強度に及ぼす供試体作製方法の影響
(b)当別砂(c)相馬砂

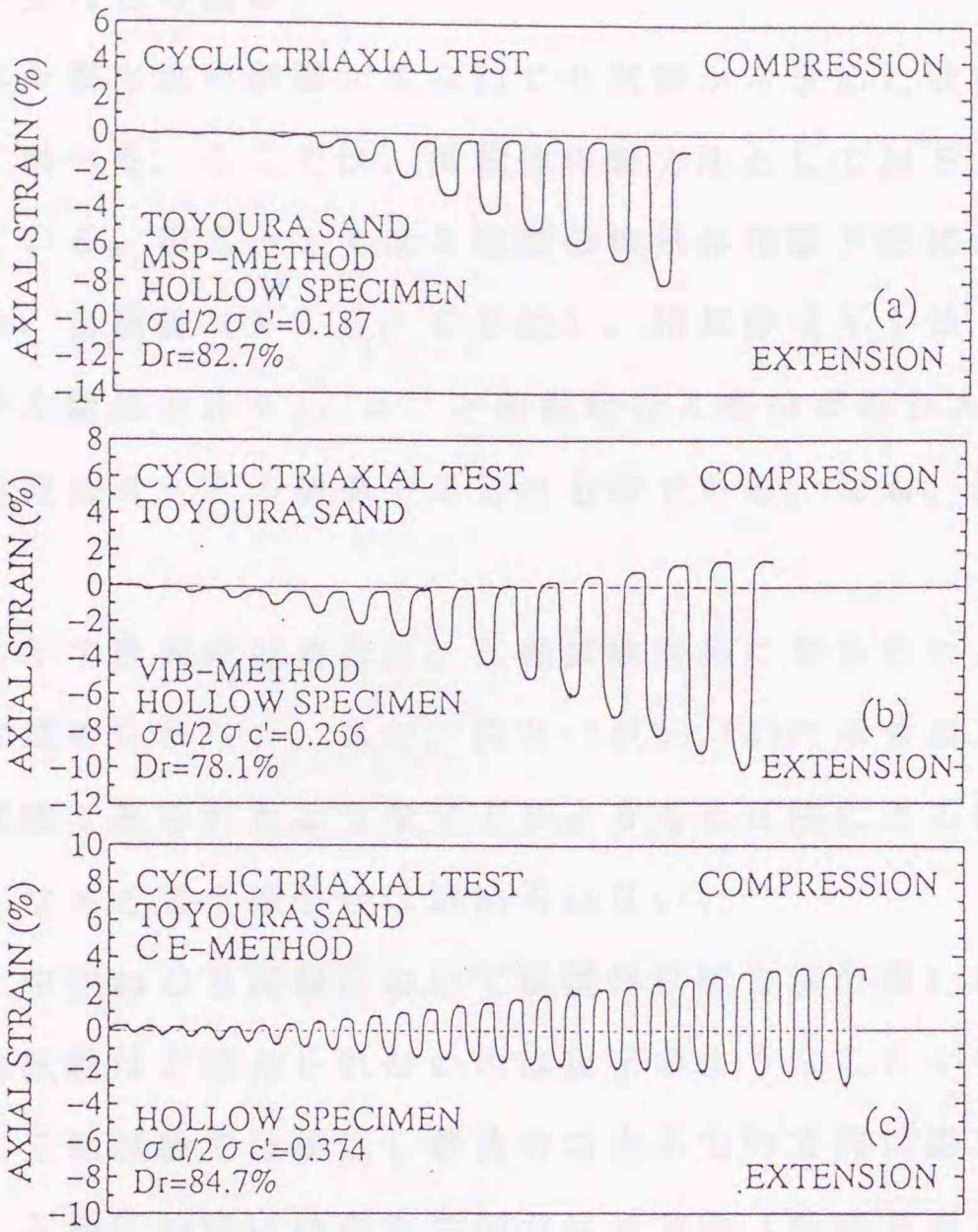


図３－12　繰返し載荷時の軸ひずみのタイムヒストリー

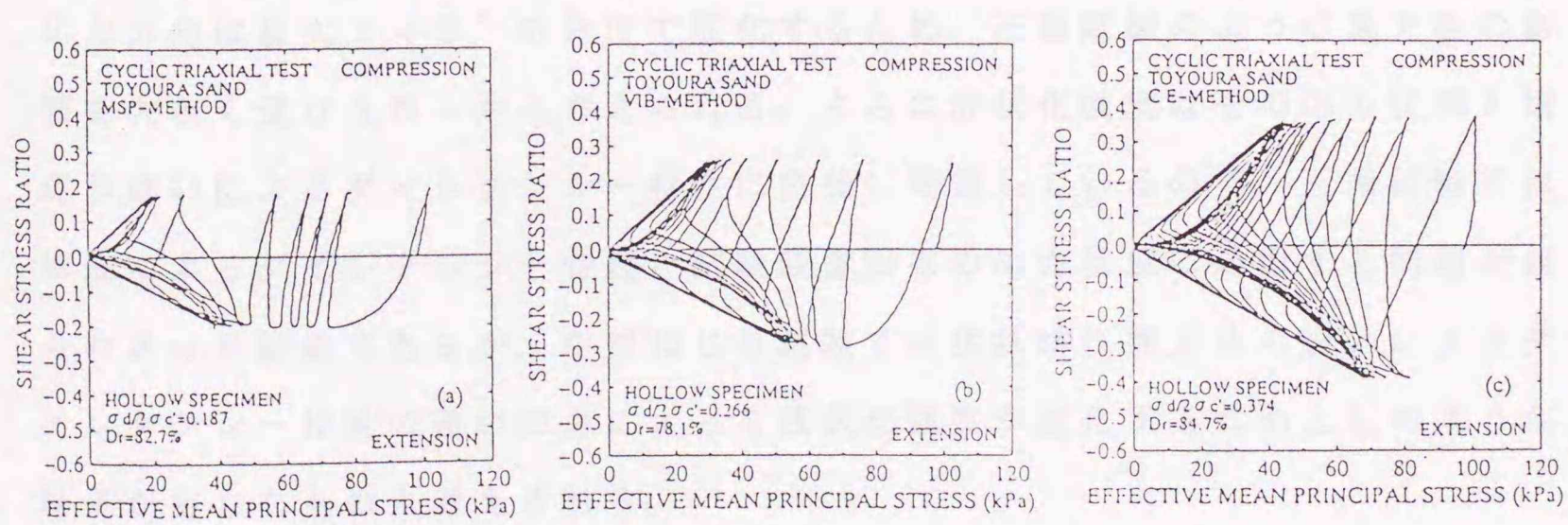


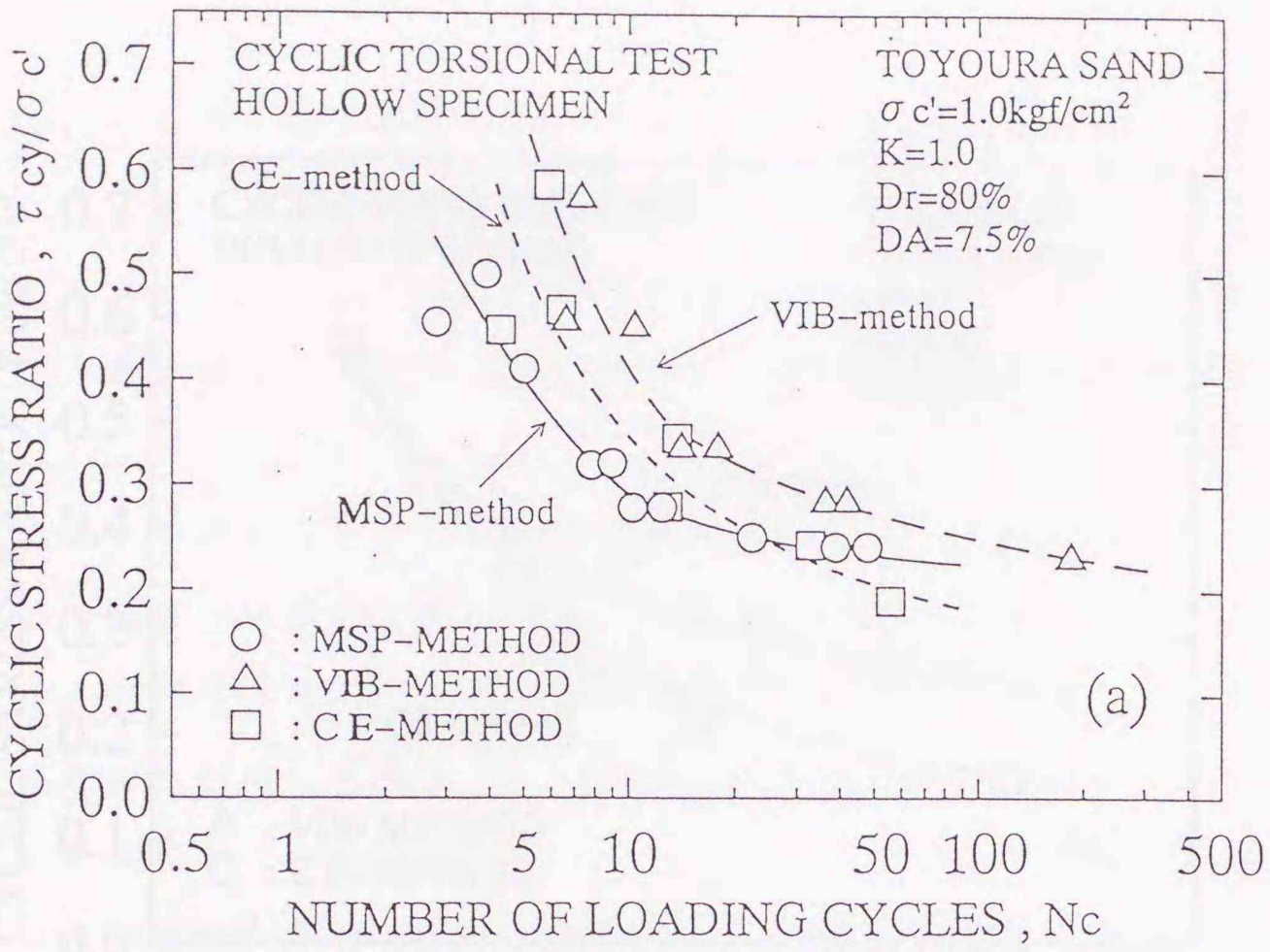
図３－13　繰返し載荷時の有効応力経路
（98kPa＝1.0kgf/cm²）

３．２．２　中空ねじり試験

次に、供試体作製方法の影響が中空ねじり試験から求めた液状化強度に及ぼす影響について調べる。ここでは、供試体作製方法としてＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法を採用している。図３－１４は３種類の供試体作製方法による液状化強度の変化を豊浦砂、当別砂（ＶＩＢ，ＣＥ法）、相馬砂（ＶＩＢ，ＣＥ法）について、繰返しせん断応力比τ_{cy}/σ_c'と両振幅せん断ひずみＤＡ＝７．５％に達するまでの載荷回数Ｎｃとの関係で示したものである。なお、試料は全て等方圧密している。

図３-14(a)に示す豊浦砂の場合は、三軸試験結果に見られたような大きな液状化強度の差は認められない。また、図３-14(b),(c)に示す当別砂と相馬砂においても三軸試験でみられたようなＶＩＢよりもＣＥ法による供試体の方が液状化強度が高くなると言う順位性は認められない。

このように、中空ねじり試験において供試体作製方法の違いによる液状化強度の相違が三軸試験ほど認められないのは以下のようなことが考えられる。先に述べたように三軸試験では繰返し載荷時の主応力の方向は鉛直および水平となるとともに、三軸圧縮時には最大主応力はＺ方向（鉛直方向）で最小主応力はＸ、Ｙ（水平方向）の２方向であるのに対して、三軸伸張時は最大主応力がＸ、Ｙの２方向で、最小主応力がＺ方向の１方向である。したがって三軸圧縮時と伸張時で応力状態が異なるため異方性の影響は三軸伸張条件での変形特性に敏感であった。それに対して、中空ねじり試験では鉛直方向に対して最大主応力方向は最大±４５°の角度で変化するため、三軸試験のような異方性の影響を大きく受けなかったと考えられる。さらに液状化強度はその応力状態と構造の違いによるダイレタンシー特性に密接に関係しているので、三軸試験では構造によるダイレタンシー特性と試験装置固有の応力状態に起因する問題が組合わさった結果であるが、中空ねじり試験では供試体作製方法の違いによるダイレタンシー特性の違いのみによって液状化強度が変化するため上記のような結果が生じたものと考えられる。



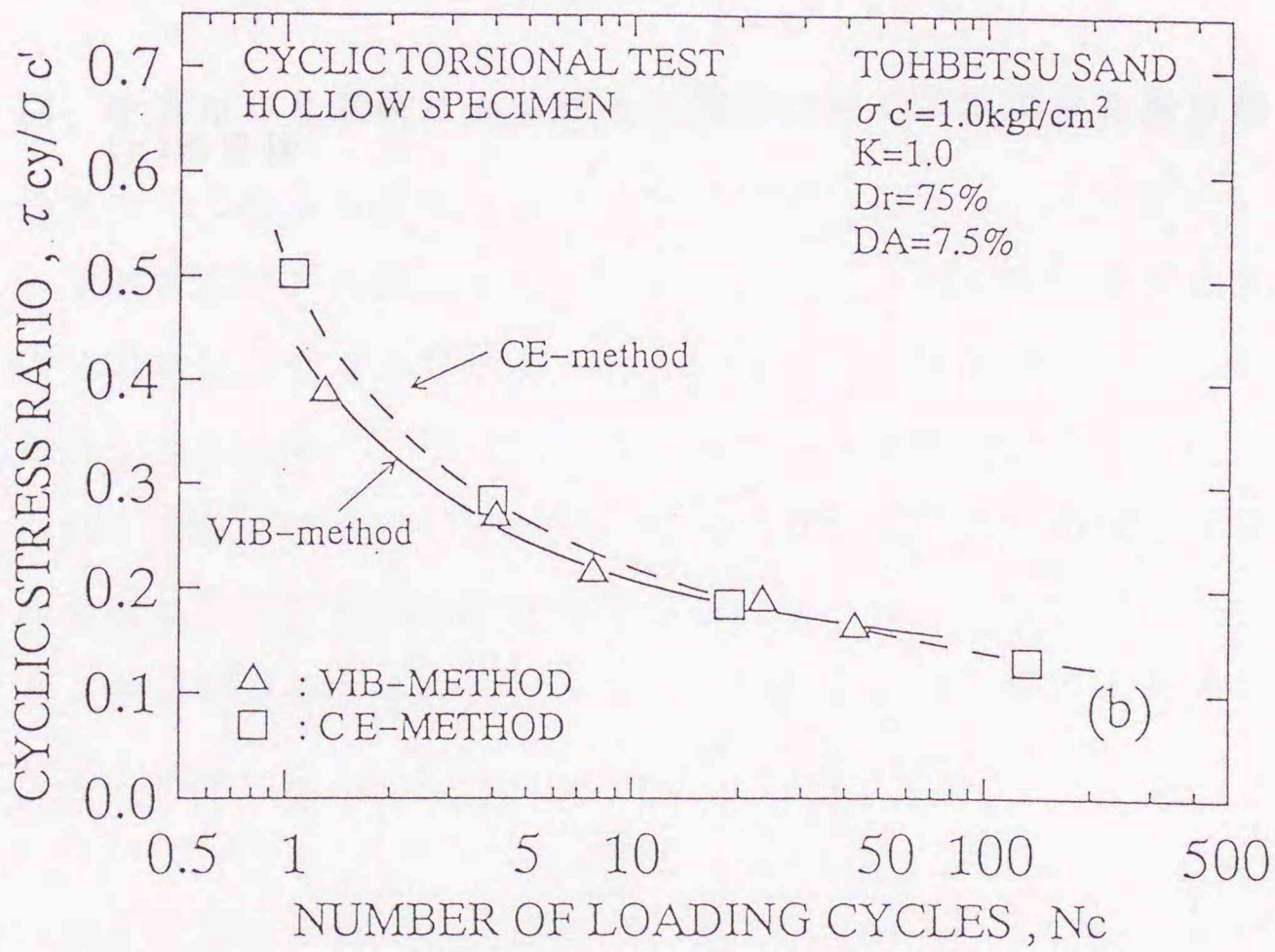


図 3 － 14　中空ねじり試験による液状化強度に及ぼす供試体作製方法の影響
(a)豊浦砂(b)当別砂

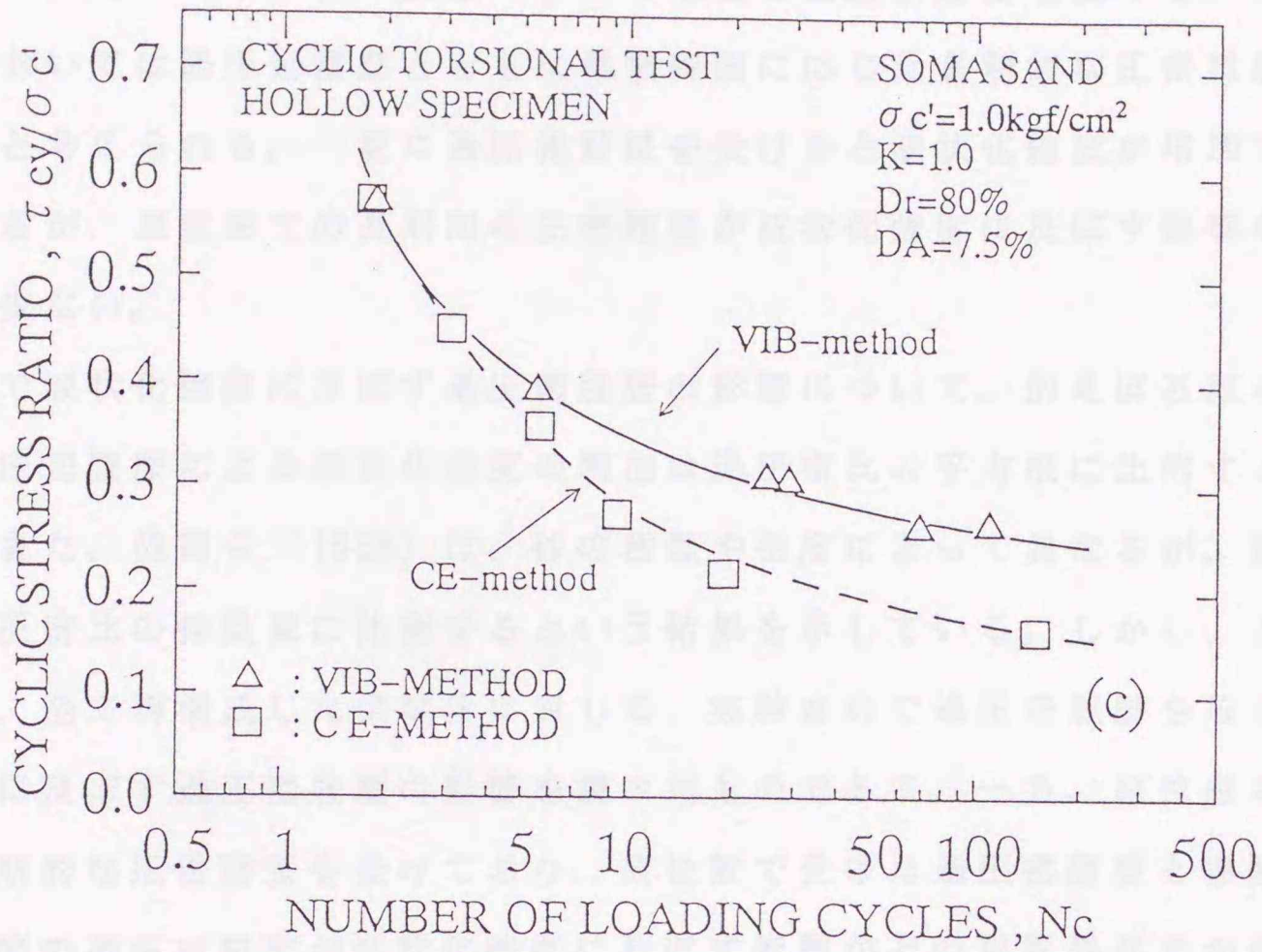


図３－14　中空ねじり試験による液状化強度に及ぼす供試体作製方法の影響
(c)相馬砂

３．３　過圧密履歴の影響

上載圧の除去や地下水位の変動によって地盤は過圧密履歴を受ける。また、原位置においては過圧密履歴とともに堆積時間に応じた長期的な圧密履歴を受けていると考えられる。一般に過圧密履歴を受けると液状化強度が増加するとされているが、原位置での長期間の圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を調べた研究は少ない。

これまで液状化強度に及ぼす過圧密履歴の影響について、例えば石原ら（1979）は過圧密履歴による液状化強度の増加は過圧密比の平方根に比例するとしている。また、龍岡ら（1988）は、砂の種類や密度によって異なるが、強度増加率は過圧密比の指数乗に比例するという結果を示している。しかし、これらの結果は、全て再構成した供試体に対して、実験室内で過圧密履歴を与え、液状化強度に及ぼす過圧密履歴の影響を調べたものである。一方、原位置においては、長期的な圧密履歴を受けており、原位置で受けた過圧密履歴と実験室内での短時間の過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響がどの程度異なるかは確かではない。

そこで、本研究では、原位置よりトリプルチューブサンプリングによって同一地点から採取深度の異なる数種の不攪乱試料（石狩Ｎｏ．２，３試料、以下Ｉ－２，Ｉ－３試料と略）を採取した。そして、その試料に対して原位置での有効土被り圧よりも低い拘束圧のもとで非排水繰返し三軸試験を行い、原位置で受けた長期的な過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を調べた。また、採取した不攪乱試料および再構成供試体を用いて実験室内で短時間の過圧密履歴を与え、液状化強度に及ぼす圧密時間の影響も調べた。

さらに、過圧密履歴の影響は試験法によって異なることはないかを調べるために、中空ねじり試験による過圧密の影響も調べ比較した。

３．３．１　原位置で受けた過圧密履歴の影響

採取した試料のうち、Ｉ－２，Ｉ－３試料を用いて原位置で受けた過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を三軸試験により調べた。すなわち、それぞれの試料の原位置における有効土被り圧は1.7および2.1 kgf/cm²と推定されたが、

試験時において原位置での有効土被り圧よりも低い拘束圧（Ｉ－２試料では$\sigma c' = 0.6$, 1.3 kgf/cm^2, Ｉ－３試料では$\sigma c' = 0.6$, 1.7 kgf/cm^2）のもとで試験を行い、原位置で受けた長期的な過圧密履歴の影響を調べた。

図３－15は、Ｉ－２試料について両振幅軸ひずみが５％に達するまでの載荷回数と繰返し応力比の関係を示したものである。図より、過圧密履歴の影響が現れ、原位置での有効土被り圧と等しい拘束圧のもとで試験を行った正規圧密状態の液状化強度に比べ、拘束圧が低いほど液状化強度は高くなっている。この傾向は、図３－16に示したＩ－３試料においても同様に認められる。試験時の有効拘束圧と原位置での有効土被り圧から過圧密比を推定すると図中に示した値となり、原位置での長期的な過圧密履歴によって液状化強度が増加したものと考えられる。

ここで、過圧密履歴の影響とともに考慮しなければならないのは、それぞれの試験で拘束圧が異なる点である。一般に液状化強度と拘束圧の関係は繰返し応力比を有効拘束圧で正規化して表示した場合、拘束圧に依存しないとされているが、低い拘束圧になった場合にはその影響は明かではない。実際に豊浦砂を用いた過去２回の全国一斉非排水繰返し三軸試験結果（文献46, 61）によると、拘束圧が0.5と1.0 kgf/cm^{2}の液状化強度を比較すると、拘束圧が低いほど液状化強度が高くなるという報告がある。

そこで、試験時の拘束圧の影響を調べるため、Ｉ－２試料について再構成供試体を用いて拘束圧が 0.6と1.7kgf/cm^{2}の場合の液状化強度を両振幅軸ひずみＤＡ＝２，５％について比較したのが図３－17である。図より、明らかに拘束圧の相違によって液状化強度に差が認められるが、繰返し応力比が低くなり載荷回数の多いところではその差は少なくなっている。再構成供試体に対して行った液状化強度に及ぼす拘束圧の影響がそのまま不攪乱試料の結果に当てはまるとは限らないが、図３－15, 16に現れた液状化強度の変化には過圧密履歴の影響とともに試験時の拘束圧の相違の影響も現れていると考えられる。ただし、拘束圧の相違による液状化強度の変化は僅かであり、過圧密履歴による影響が、特に応力比の低い所で液状化強度を増加させた要因であることに変わりない。

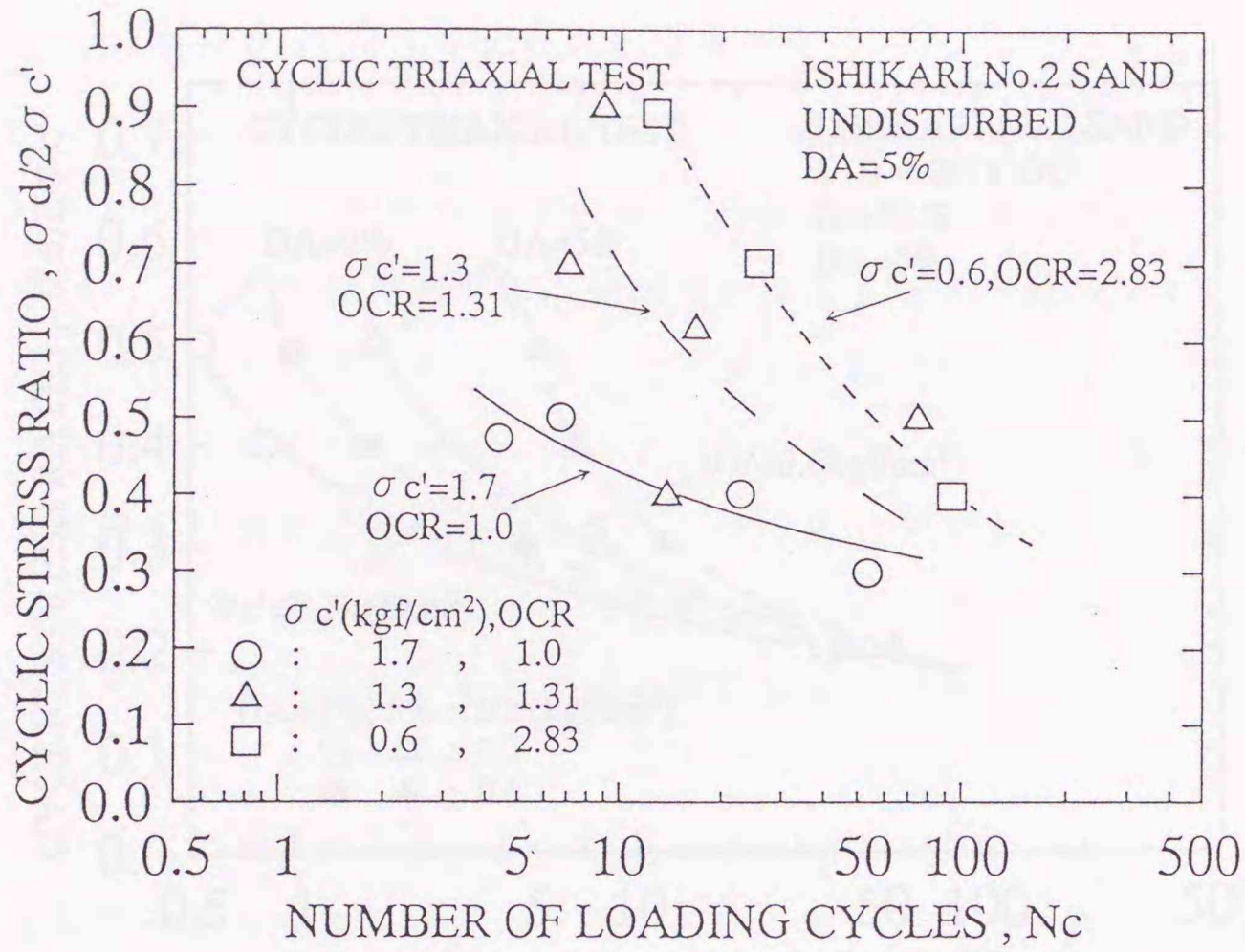


図３－15　原位置で受けた過圧密履歴の影響（石狩No.2砂）

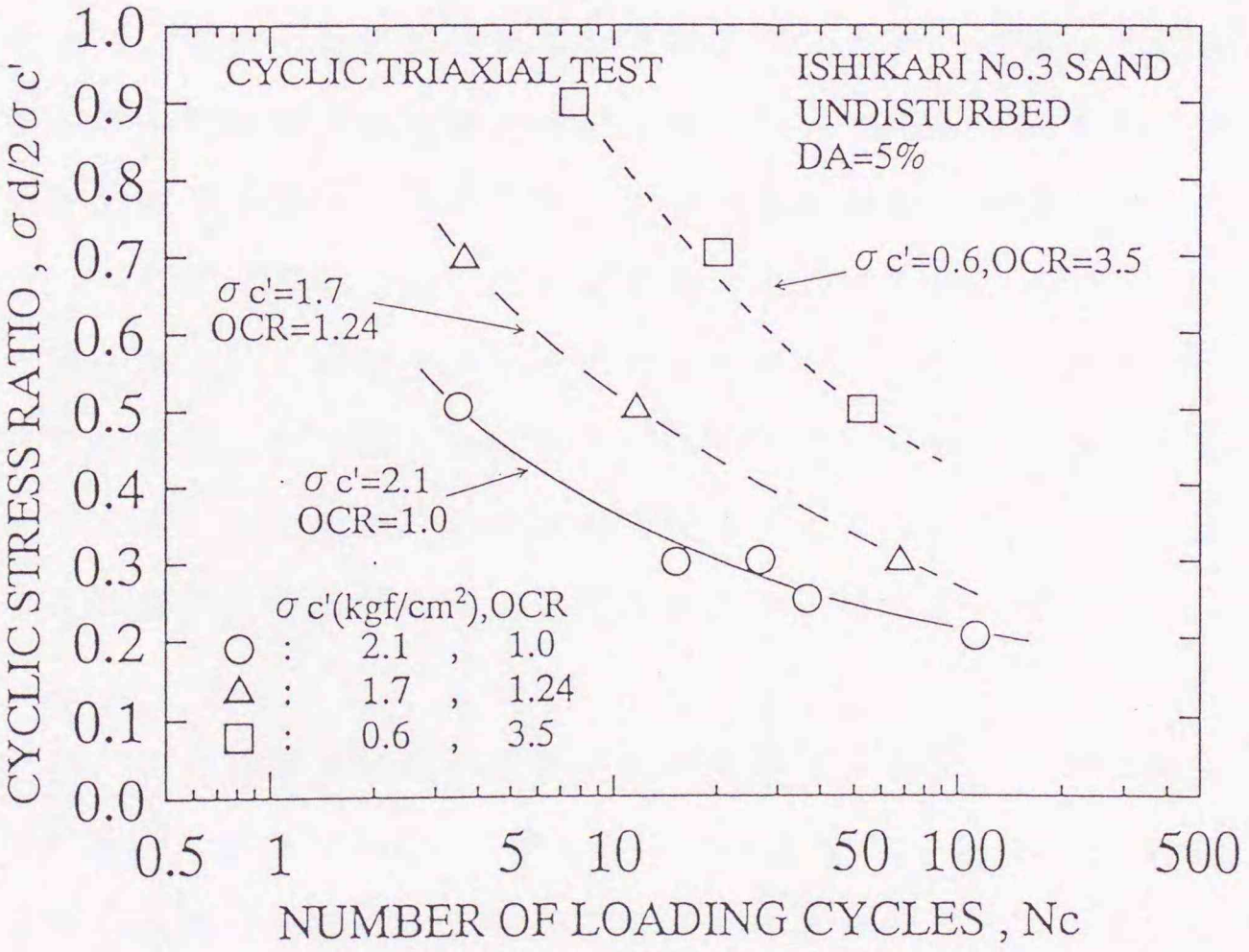


図３－16　原位置で受けた過圧密履歴の影響（石狩No.3砂）

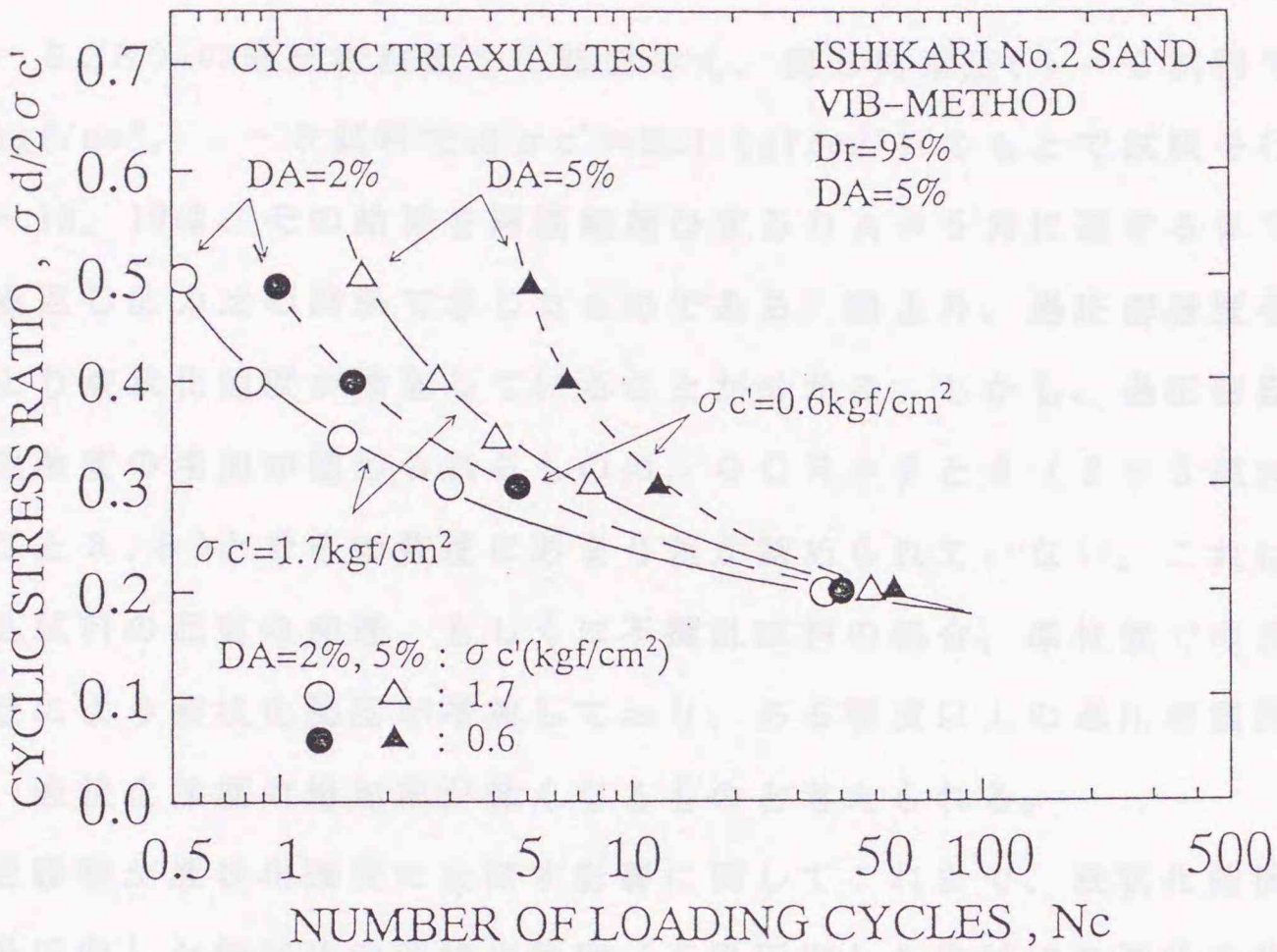


図 3 － 17　拘束圧の影響（石狩No. 2砂）

３．３．２　室内で与えた過圧密履歴の影響

次に、実験室内で与えた短時間の過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を調べるために、Ｉ－２，Ｉ－３試料についてＯＣＲ＝２，４（Ｉ－３試料ではＯＣＲ＝２，３．８）の過圧密履歴を１時間与え、同じ拘束圧（Ｉ－２試料では$\sigma c'$＝1.7 kgf/cm²，Ｉ－３試料では$\sigma c'$＝2.1 kgf/cm²）のもとで試験を行った。

図３－18，19は、その結果を両振幅軸ひずみＤＡ＝５％に達するまでの載荷回数と繰返し応力比の関係で示したものである。図より、過圧密履歴を与えることにより液状化強度が増加していることが分かる。しかし、過圧密履歴により液状化強度の増加が認められるものの、ＯＣＲ＝２と４（Ｉ－３試料ではＯＣＲ＝２と３．８）とでその強度にあまり差が認められていない。これは、用いた不攪乱試料の品質の相違、もしくは不攪乱試料の場合、原位置での長期的な圧密履歴により液状化強度が増加しており、ある程度以上の過圧密履歴を与えた場合、液状化強度の増加率が低くなるものと考えられる。

過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響に関してこれまで、液状化強度増加率Ｒｓ（過圧密した供試体の液状化強度／正規圧密した供試体の液状化強度）はＯＣＲと両対数紙上で直線関係にあるとされている。今回行った試験結果について、ＯＣＲと液状化強度の関係を両対数で比較すると図３－20に示すようになる。図より、室内で短時間の過圧密履歴を与えた場合の液状化強度増加率に比べ、試験時の拘束圧が原位置の有効土被り圧よりも低い拘束圧で試験を行い、過圧密履歴の影響を調べたものの方が液状化強度増加率が高くなっている。

ここで、ＯＣＲは有効土被り圧から推定しているため、同じＯＣＲであっても室内で過圧密を行った場合の応力状態とは異なっている（例えば、平均主応力でＯＣＲを定義した場合、鉛直応力が等しくても室内で過圧密した方がＯＣＲが大きくなる）にもかかわらず強度増加は大きくなっていることからも、原位置での長時間の圧密履歴が液状化強度に大きく影響を及ぼしていることが分かる。

また、ＯＣＲと強度増加率の関係は載荷回数によらず１本の直線で表されるとされているが、図３－20(a)に示したＩ－２試料のＯＣＲ=１．３と２．８では比較する載荷回数の増加にともなって強度増加率が低下している。これは図３－18で示したように、試験時の拘束圧が異なる場合、比較する載荷回数が少な

い所では、正規圧密砂においても強度に差が現れるためと思われる。しかし、図３－20(b)に示したＩ－３試料においてはその傾向は認められない。Ｉ-３試料は、試験時の拘束圧が0.6から2.1kgf/cm²とＩ－２試料（0.6～1.7kgf/cm²）よりも拘束圧に差があり、拘束圧の影響がより明確に現れるはずである。これは、液状化強度線を３～４本程度の不攪乱試料から求めているため、不攪乱試料の僅かな品質の相違によっても液状化強度線の位置が変化すると考えられるので、Ｉ－２，Ｉ－３試料に対して統一的な影響が認められなかったと考えられる。しかし、相対的にみて液状化強度に及ぼす過圧密履歴の影響は、室内で与えた短時間の過圧密履歴よりも、原位置での長期的な過圧密履歴の方が大きな液状化強度の増加をもたらすと考えられる。

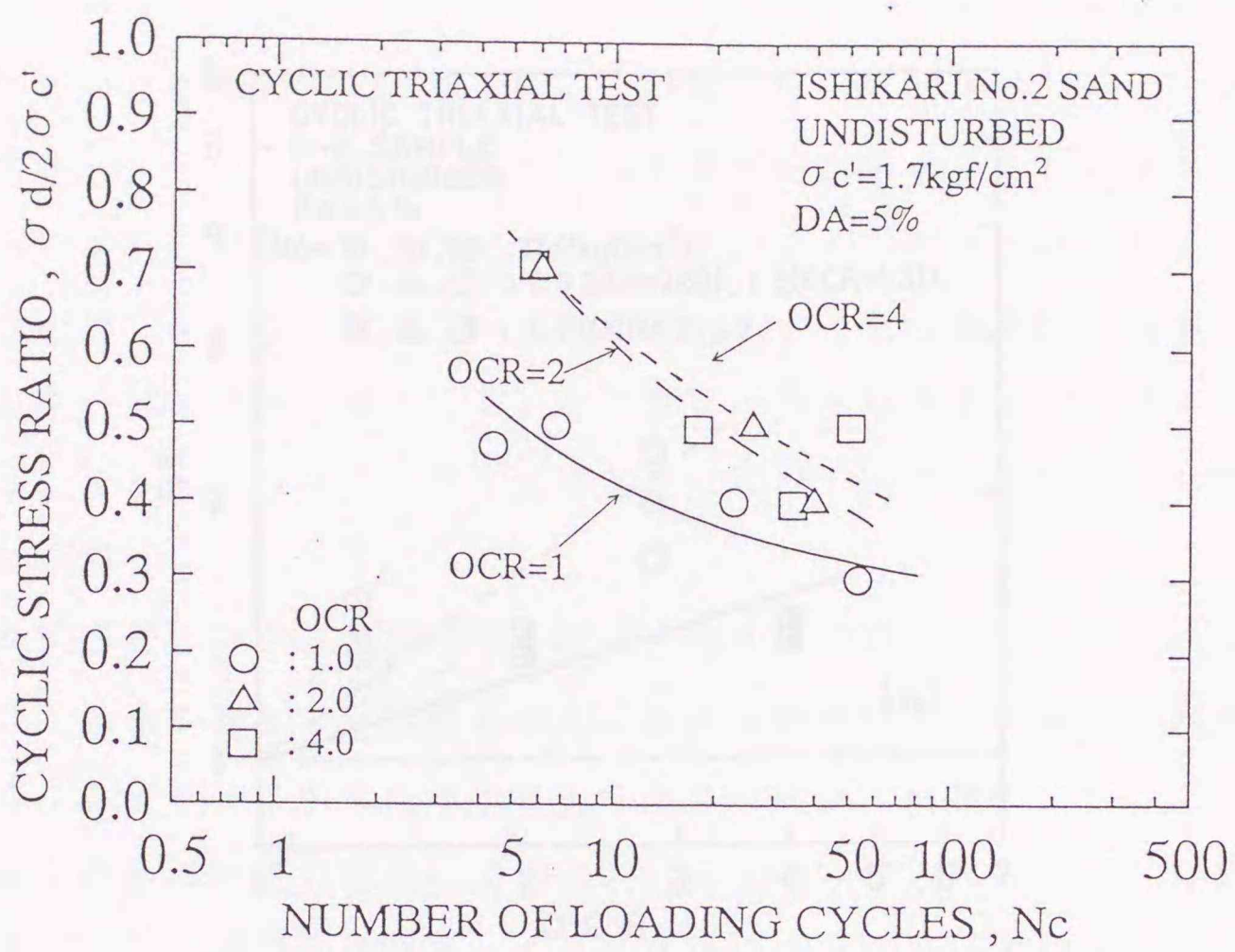


図 3 － 18　室内で与えた過圧密履歴の影響（石狩No. 2砂）

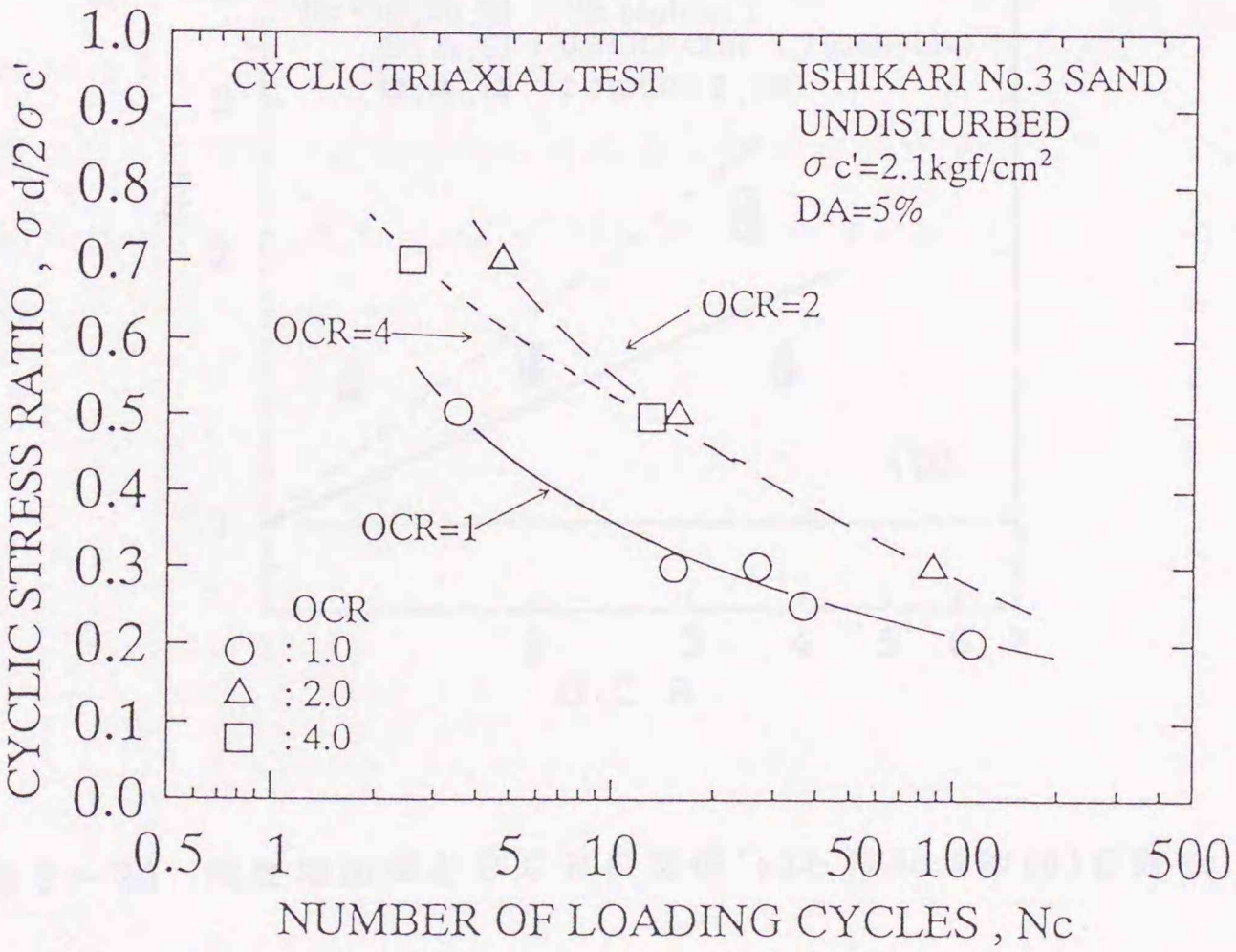
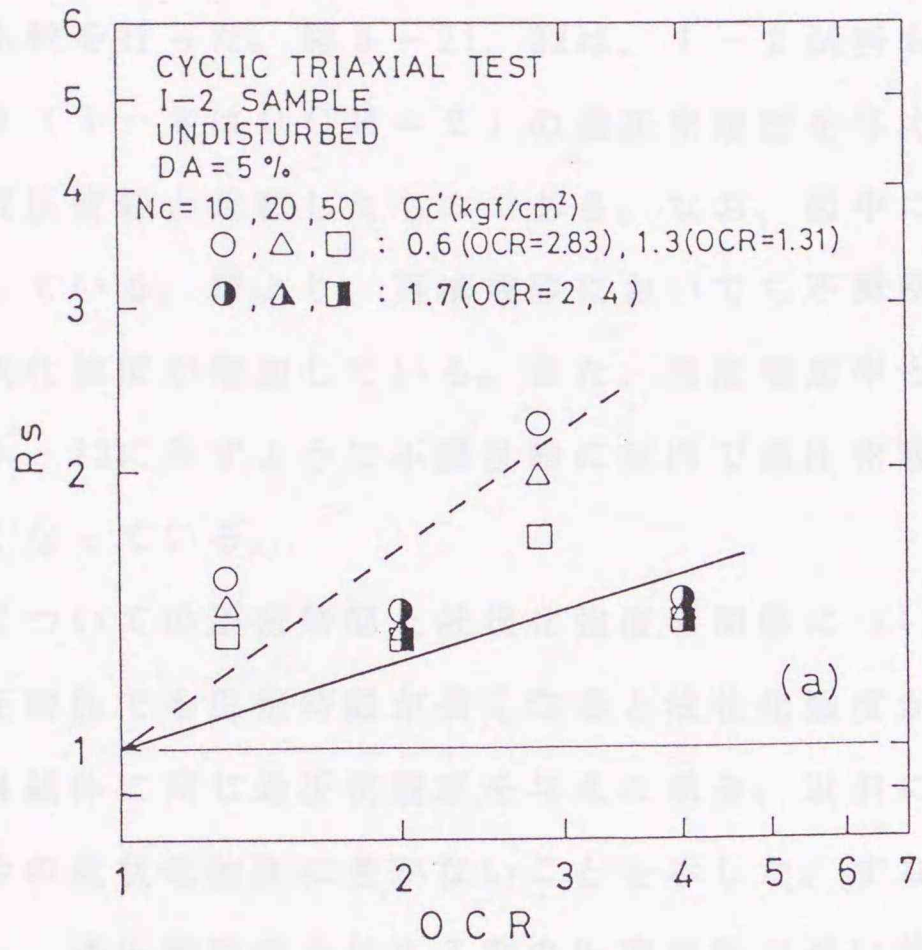


図 3 － 19　室内で与えた過圧密履歴の影響（石狩No. 3砂）



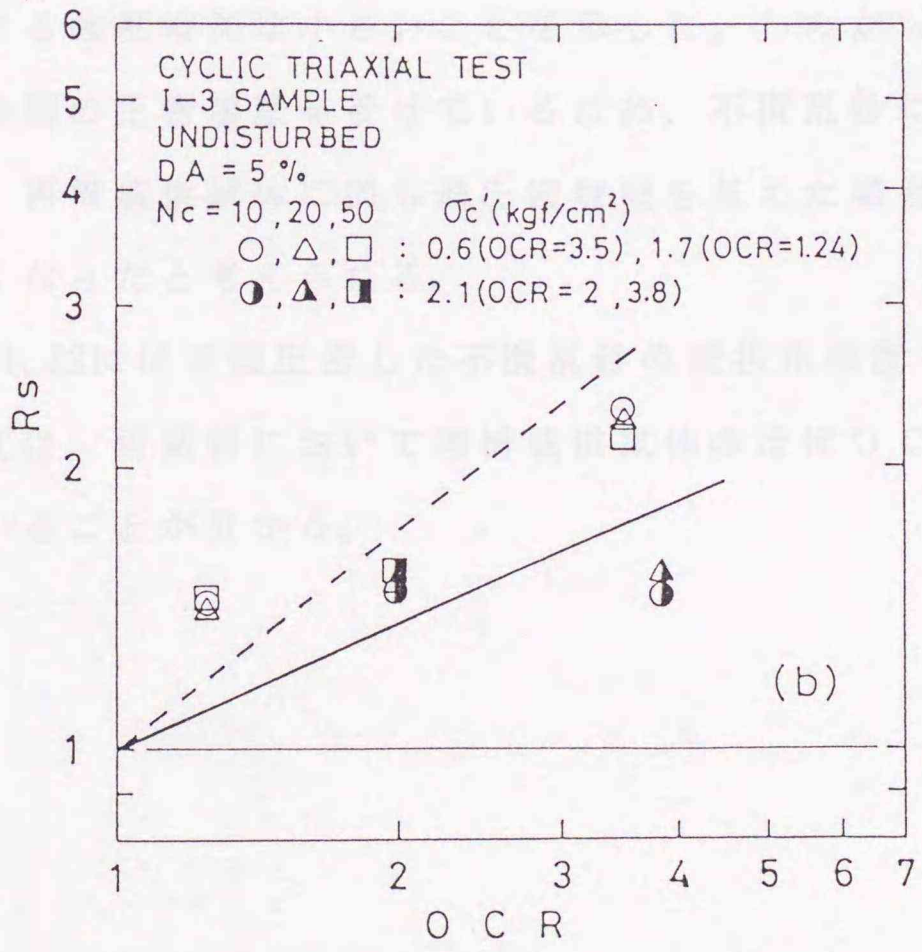


図３－20　強度増加率とＯＣＲの関係(a)石狩No.2砂(b)石狩No.3砂

３．３．３　再構成砂における過圧密履歴の影響

ここでは、再構成供試体（ＶＩＢ法）に過圧密履歴を与え、不攪乱供試体の液状化強度との比較を行った。図３－21，22は、Ｉ－２試料およびＩ－３試料にＯＣＲ＝２，４（Ｉ－３はＯＣＲ＝２）の過圧密履歴を与えた場合の液状化強度の変化を正規圧密砂と比較したものである。なお、図中には不攪乱試料の結果も破線で示している。図より、再構成砂においても不攪乱砂と同様に過圧密履歴により液状化強度が増加している。また、強度増加率とＯＣＲの関係を比較すると、図３－23に示すように不攪乱砂に室内で過圧密履歴を与えた場合よりも僅かに高くなっている。

再構成供試体についての圧密時間と液状化強度の関係について、龍岡ら（1988）は同じ正規圧密砂でも圧密時間が長くなると液状化強度が増加するが、圧密時間の異なる供試体に同じ過圧密履歴を与えた場合、以前に受けた圧密時間によらず過圧密砂の液状化強度に差がないことを示した。すなわち、同じ過圧密履歴を与えても、過圧密履歴を与える前の圧密時間が長い供試体の方が、過圧密履歴のみによる強度増加は小さいことを示した。したがって、不攪乱供試体は原位置で長時間の圧密履歴を受けているため、不攪乱砂に室内で過圧密履歴を与えた場合、再構成供試体に同じ過圧密履歴を与えた場合よりも液状化強度の増加率が低くなったと考えられる。

また、図３－21,22には正規圧密した不攪乱砂の液状化強度も示したが、不攪乱砂の液状化強度は、両試料において再構成供試体のほぼＯＣＲ＝２の液状化強度に相当していることが分かる。

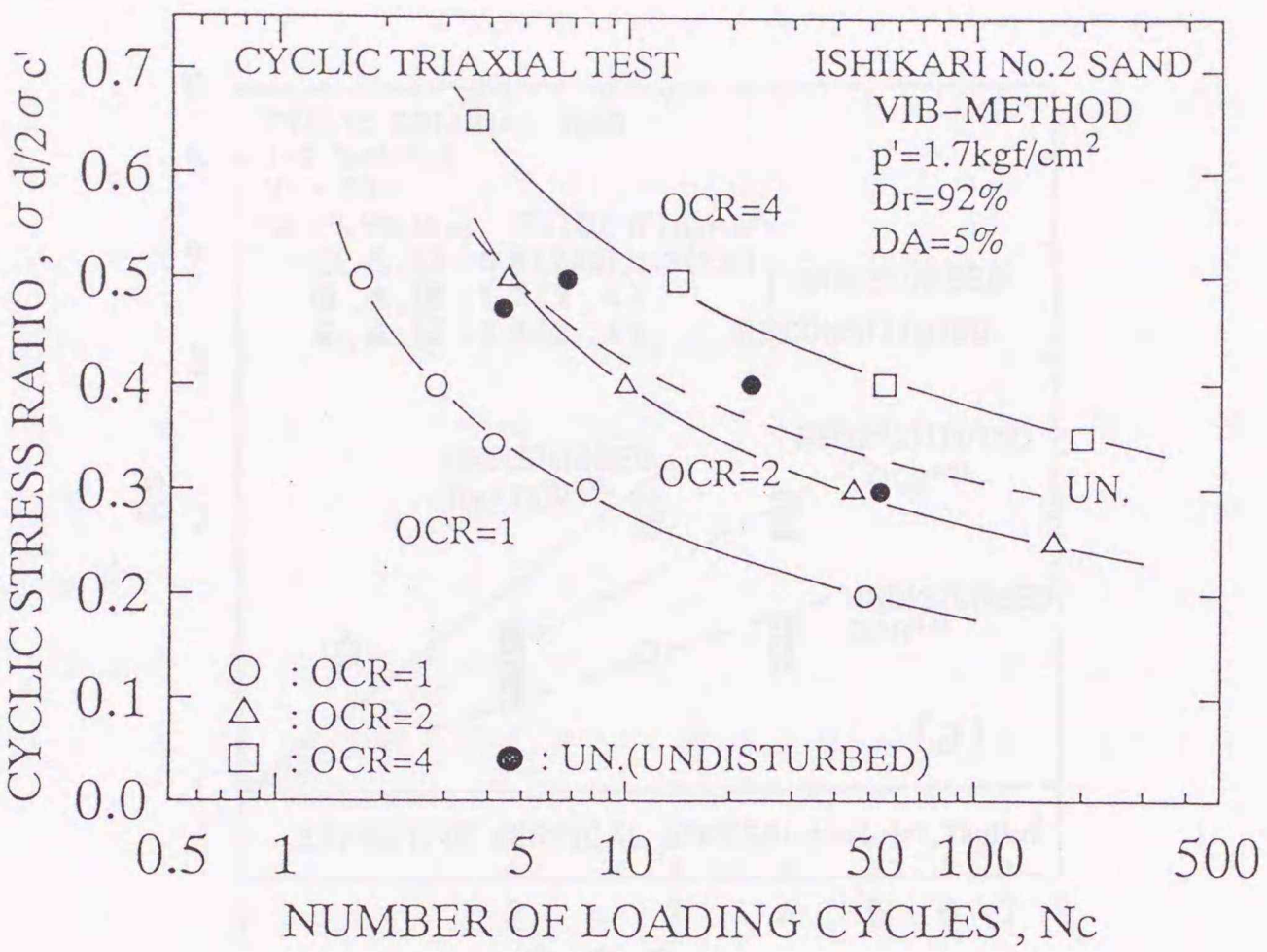


図 3 － 21　再構成砂における過圧密履歴の影響（石狩No. 2砂）

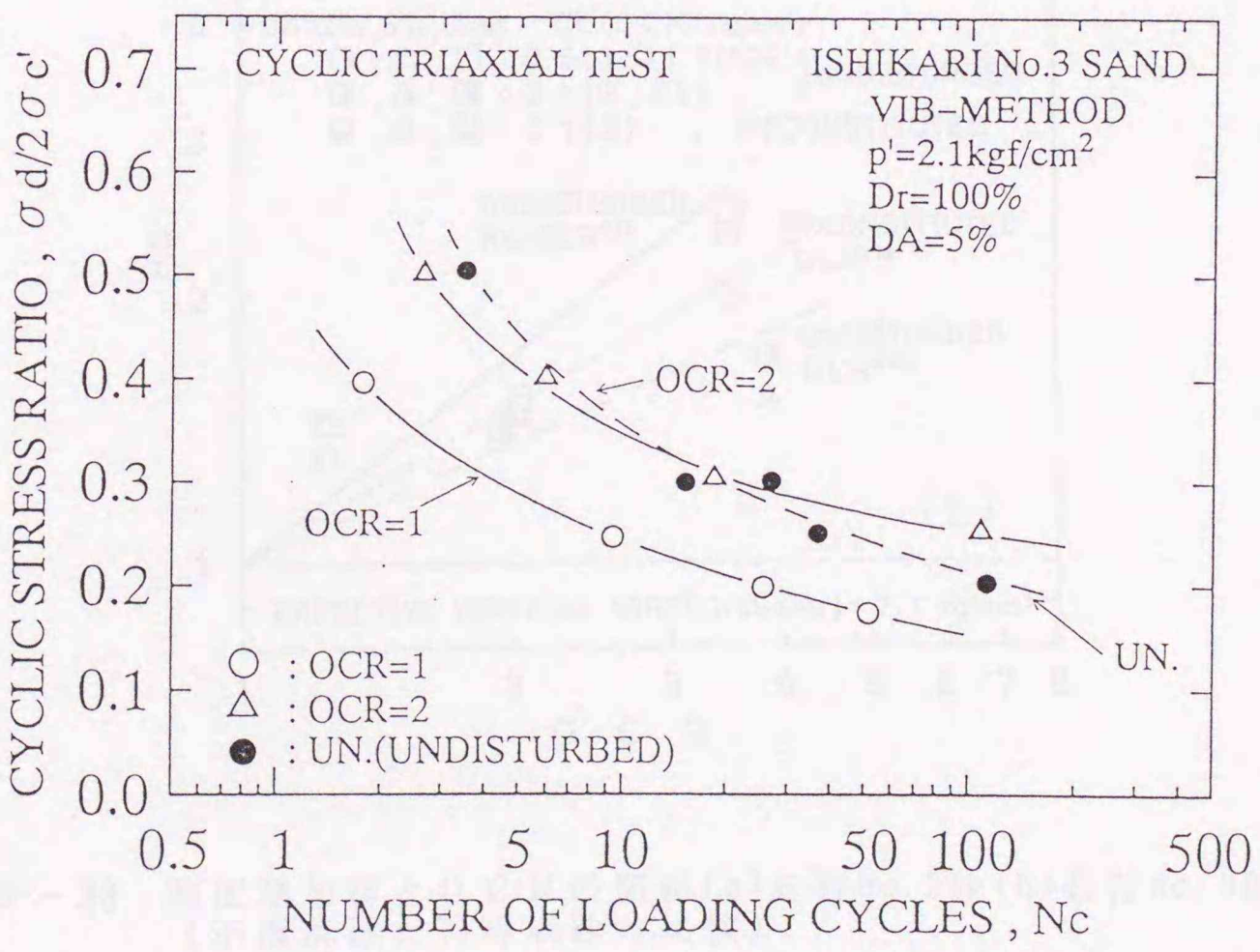
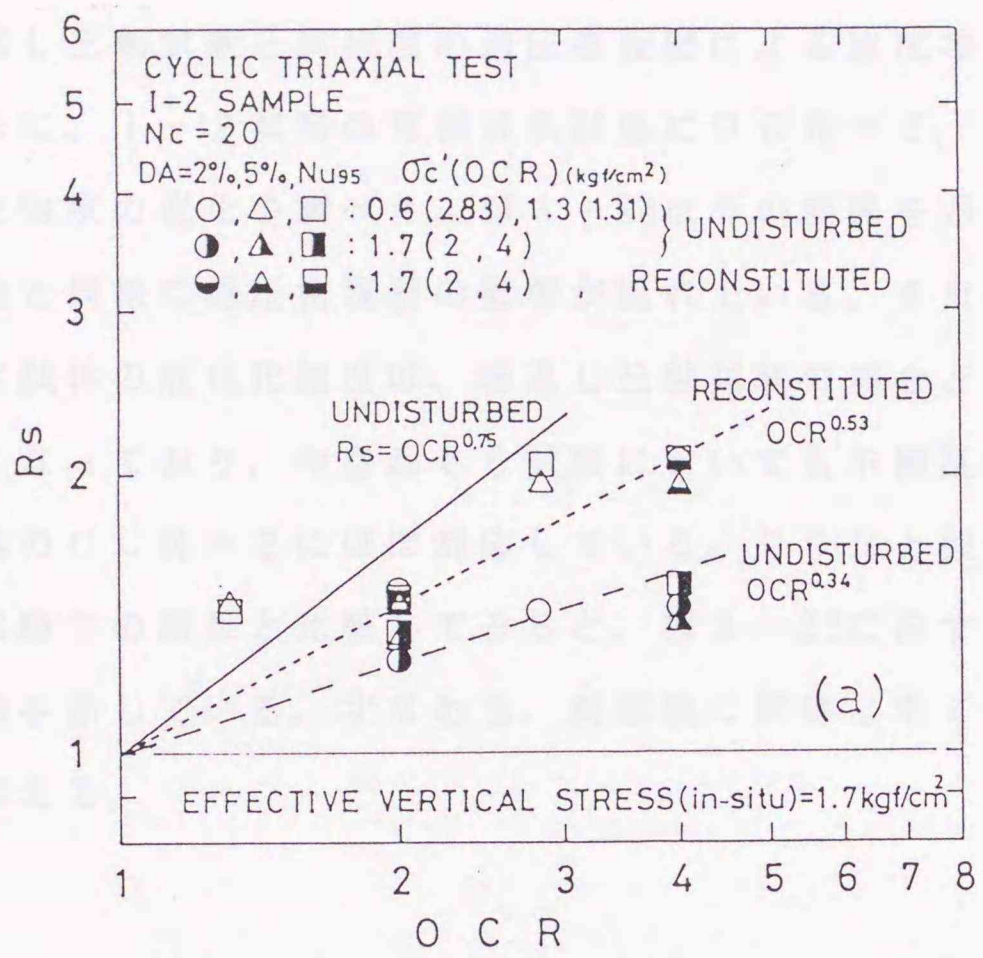


図 3 － 22　再構成砂における過圧密履歴の影響（石狩No. 3砂）



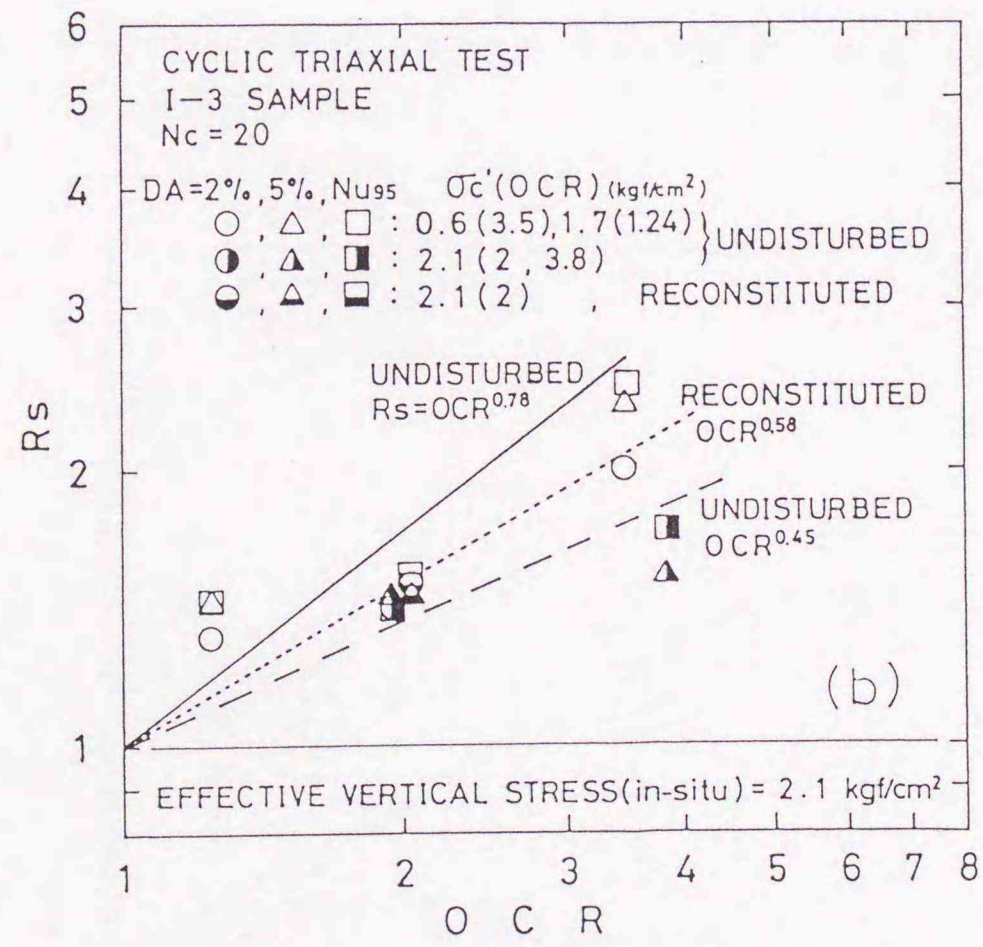


図３－23　強度増加率とＯＣＲの関係(a)石狩No.2砂(b)石狩No.3砂
（不撹乱砂と再構成砂の比較）

３．３．４　三軸試験と中空ねじり試験による比較

繰返し三軸試験における過圧密履歴の影響を先に示したが、中空ねじり試験においても繰返し三軸試験と同程度の過圧密履歴による強度増加が認められるかを調べるために、Ｉ－２試料の再構成供試体にＯＣＲ＝２，４の過圧密履歴を与え、液状化強度の変化を調べた。図３－24はその関係を示したものである。繰返し三軸試験と同様に過圧密履歴の影響が現れている。また、図中に破線で示した不攪乱供試体の液状化強度は、繰返し三軸試験の場合と同様に再構成供試体よりも高くなっており、中空ねじり試験においても不攪乱砂の液状化強度は再構成供試体のＯＣＲ＝２にほぼ対応している。ＯＣＲと強度増加率の関係を繰返し三軸試験での結果と比較してみると、図３－25に示すように、ほぼ等しい強度増加率を示している。すなわち、両試験に同様な形で過圧密履歴の影響が現れると言える。

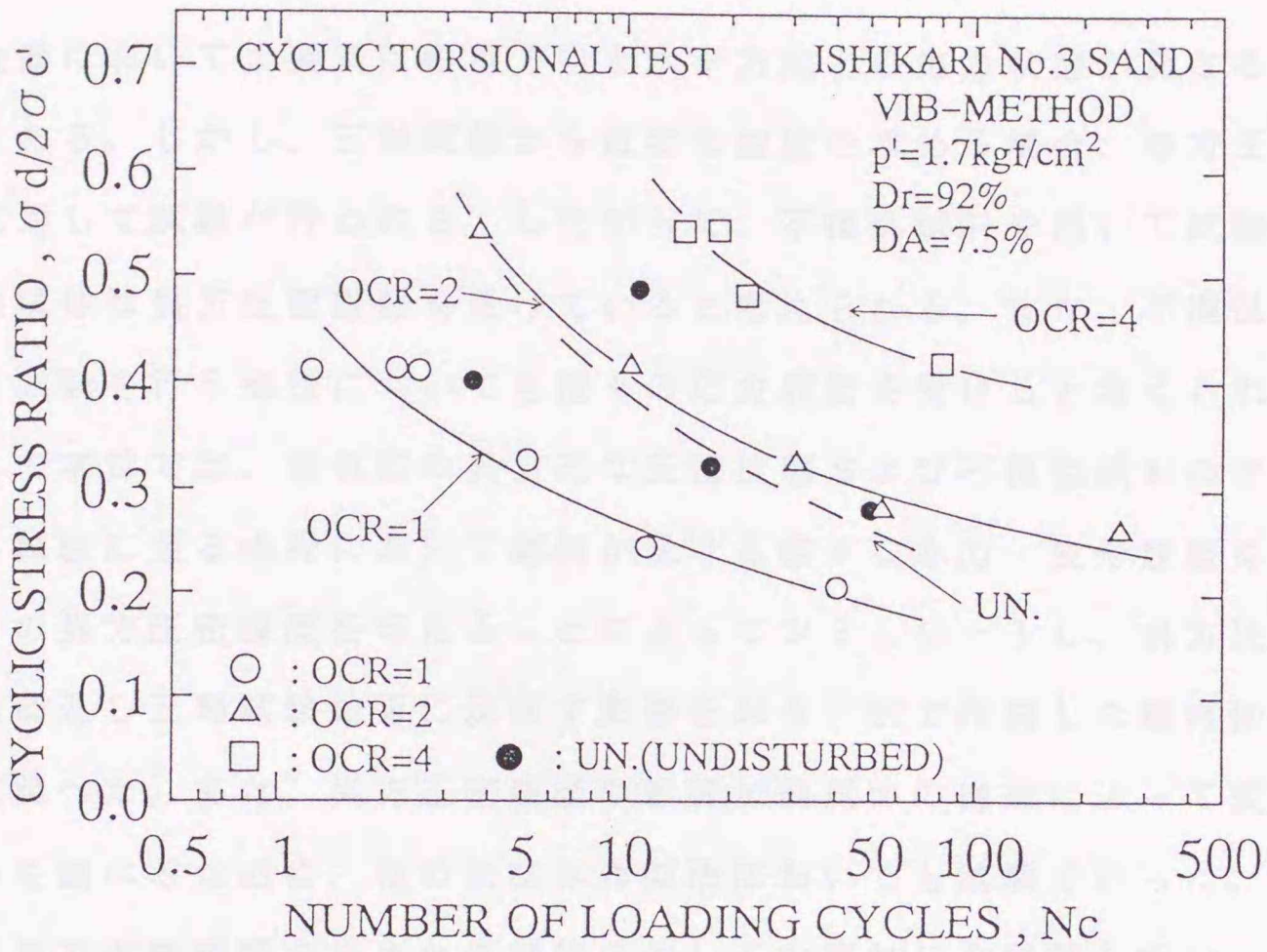


図３－24　中空ねじり試験における過圧密履歴の影響（石狩No.2砂）

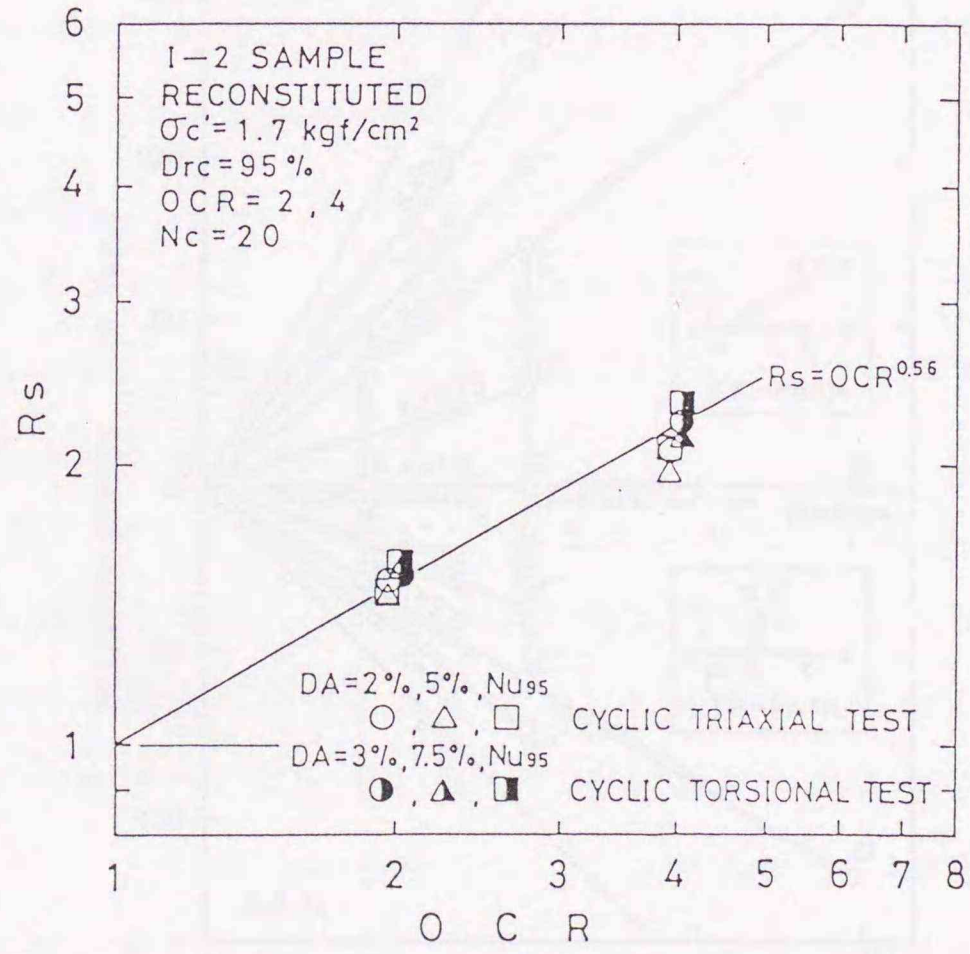


図３－25　強度増加率とＯＣＲの関係（三軸と中空ねじり試験の比較）

3．4　異方圧密履歴の影響

原位置において土要素は鉛直方向と水平方向との応力状態が異なる異方圧密状態にある。しかし、三軸試験から液状化強度を求める場合、等方圧密した供試体に対して試験が行われる。したがって、不撹乱試料を用いて試験を行う場合、供試体は異方圧密履歴を受けていると考えられる。また、不撹乱試料を採取して試験を行う過程においても種々の応力履歴を受けると考えられる。

そこで本節では、原位置の異方的な圧密状態および不撹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ＭＳＰ法で作製した豊浦砂供試体で詳細に調べた。また、異方圧密履歴の影響が供試体の構造によって変化しないものかを調べるために、他の供試体作製法においても試験を行った。さらに、同様な異方圧密履歴を与えた供試体に対して中空ねじり試験も行い、異方圧密履歴の影響は試験方法によって変化しないかも調べた。ここで、異方圧密履歴を与えた際の応力経路を図３－26に示す。

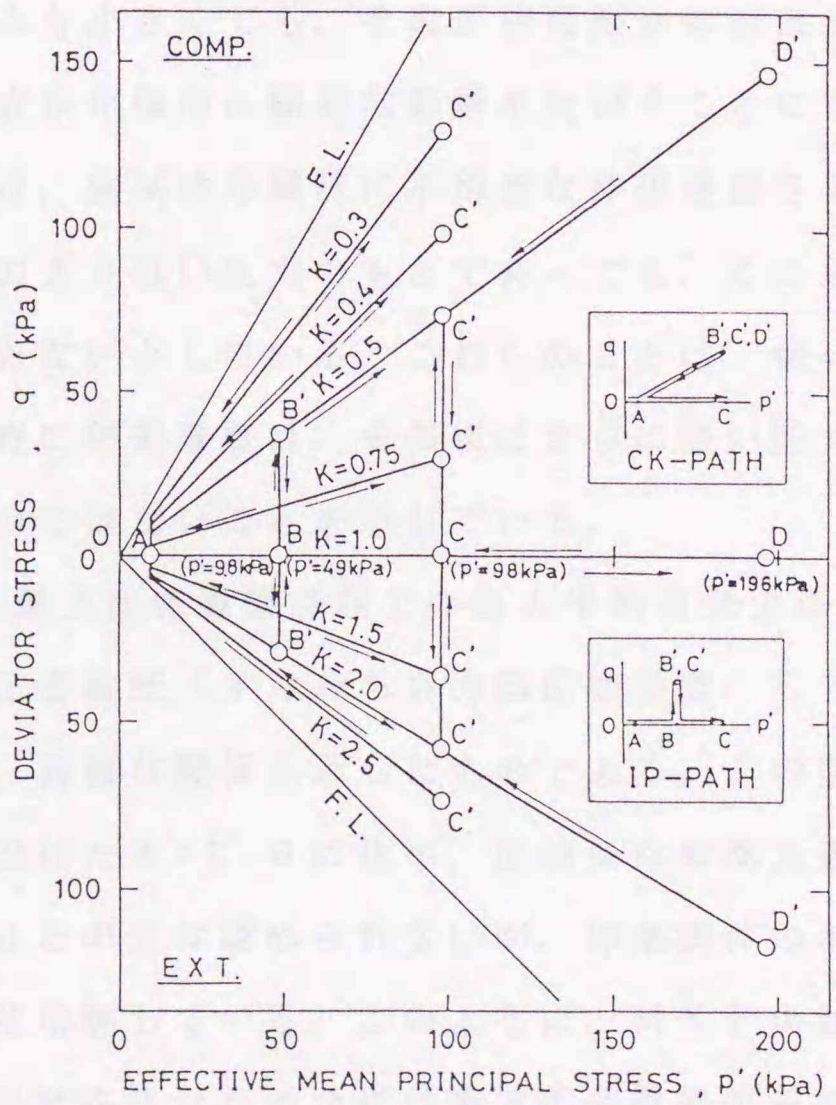


図３－26　圧密時の応力経路
（98kPa＝1.0kgf/cm²）

３．４．１　異方圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響

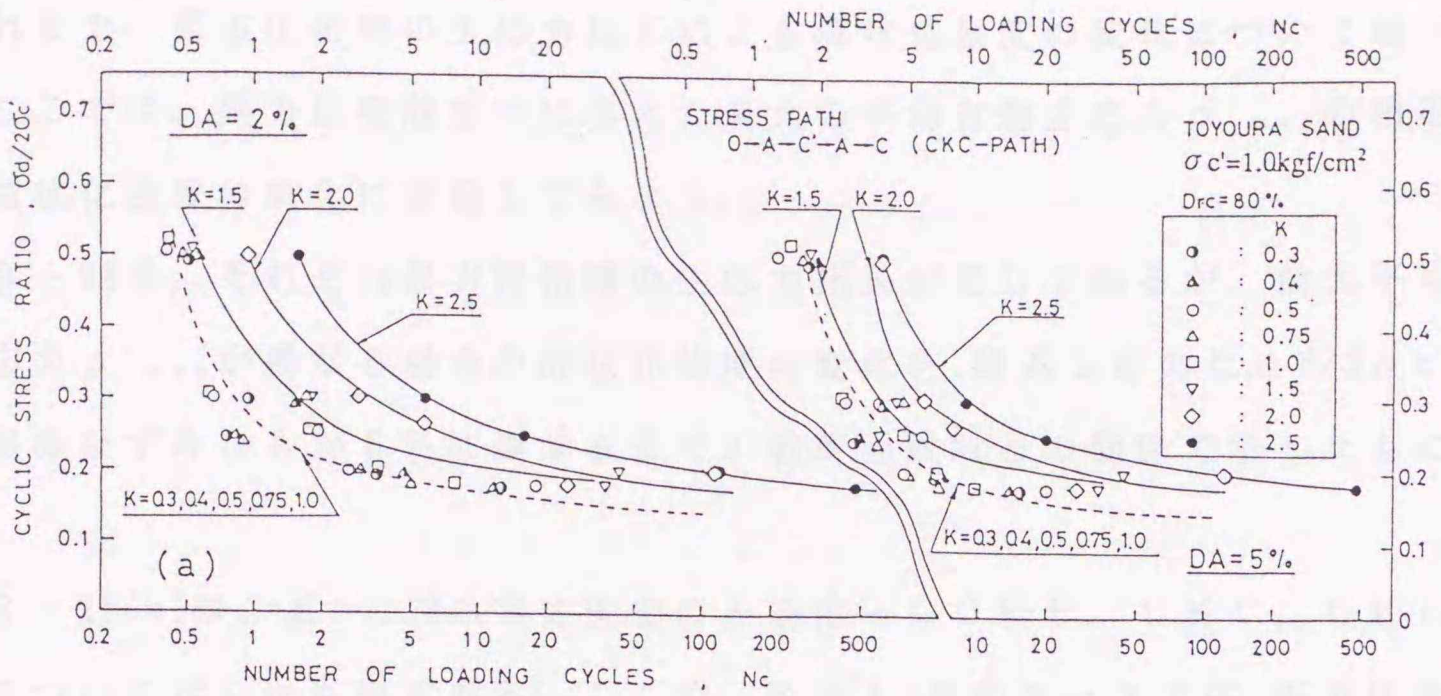
図３-27(a)は、豊浦砂のＭＳＰ供試体に、異方圧密時の最大平均有効主応力p'_{max}＝１．０kgf/cm²で異方圧密履歴を与えたＣＫＣ－経路について、繰返し応力比$\sigma d/2\sigma c'$と、両振幅軸ひずみＤＡが２％および５％に達するまでの載荷回数　Ｎｃとの関係を、異方圧密時の主応力比Ｋで比較したものである。図から明らかなように、異方圧密時の主応力比Ｋの違いによる液状化強度の変化が認められる。すなわち、Ｋが１．０（等方圧密）以上の伸張条件の異方圧密履歴を与えると、Ｋの増加に従って液状化強度が増加している。しかし、Ｋが１.０以下の圧縮条件の異方圧密履歴を与えた場合には、等方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３-27(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０．５kgf/cm²で異方圧密を行ったＣＫＢ－経路について、図３-27(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。

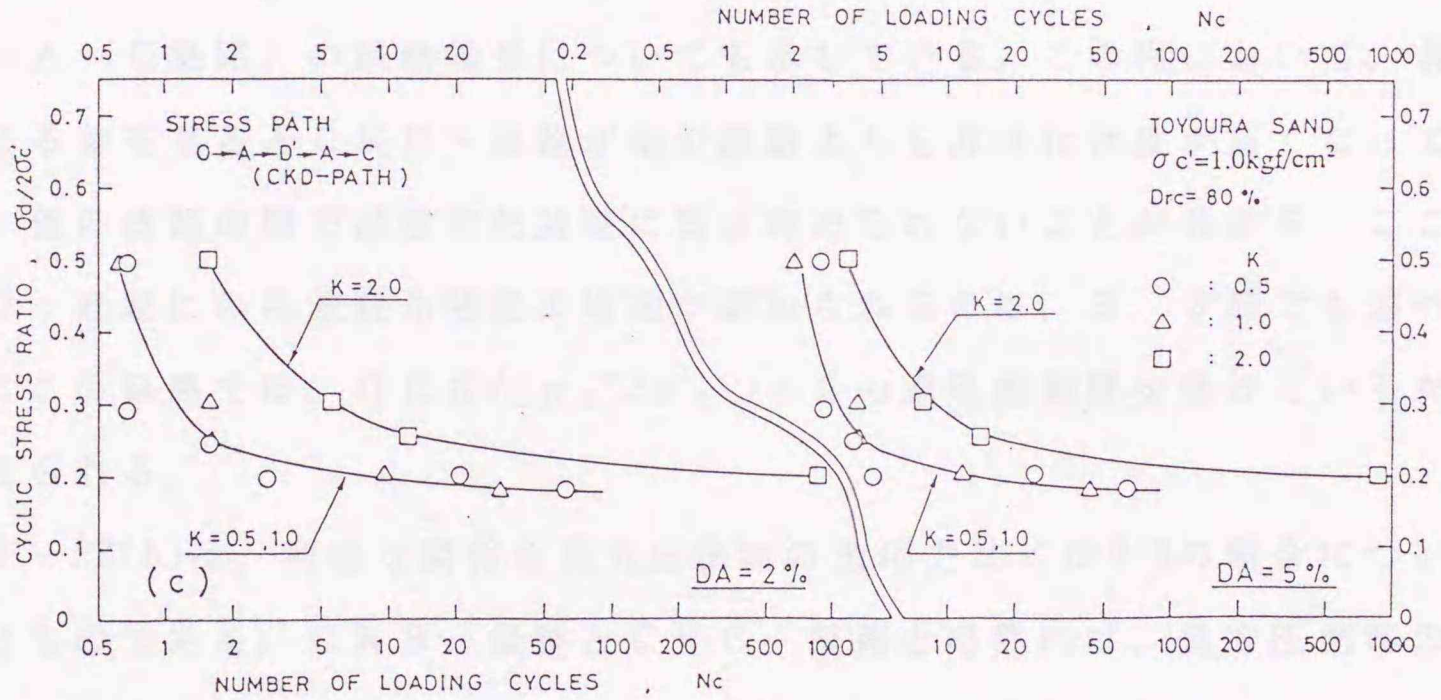
山田ら（1983）は、供試体作製時に不用意な伸張履歴を与えると、たとえ試験時の等方圧密圧力より低い圧力のもとであっても、その後の液状化特性に及ぼす影響は無視できないとしている。これらのことは、低い拘束圧の下での異方的な圧密履歴、特に伸張履歴は、その後にさらに高い圧力で圧密を行っても決して消滅するものではないことを示している。

図３－27(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、ＭＳＰ供試体においては、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、ここで用いた供試体は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（三浦ら，1984）。このような粒子配列構造を持つ供試体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。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。なお、初期構造の相違が異方圧密履歴を受けた供試体の液状化強度に及ぼす影響については３．４．５で詳述する。





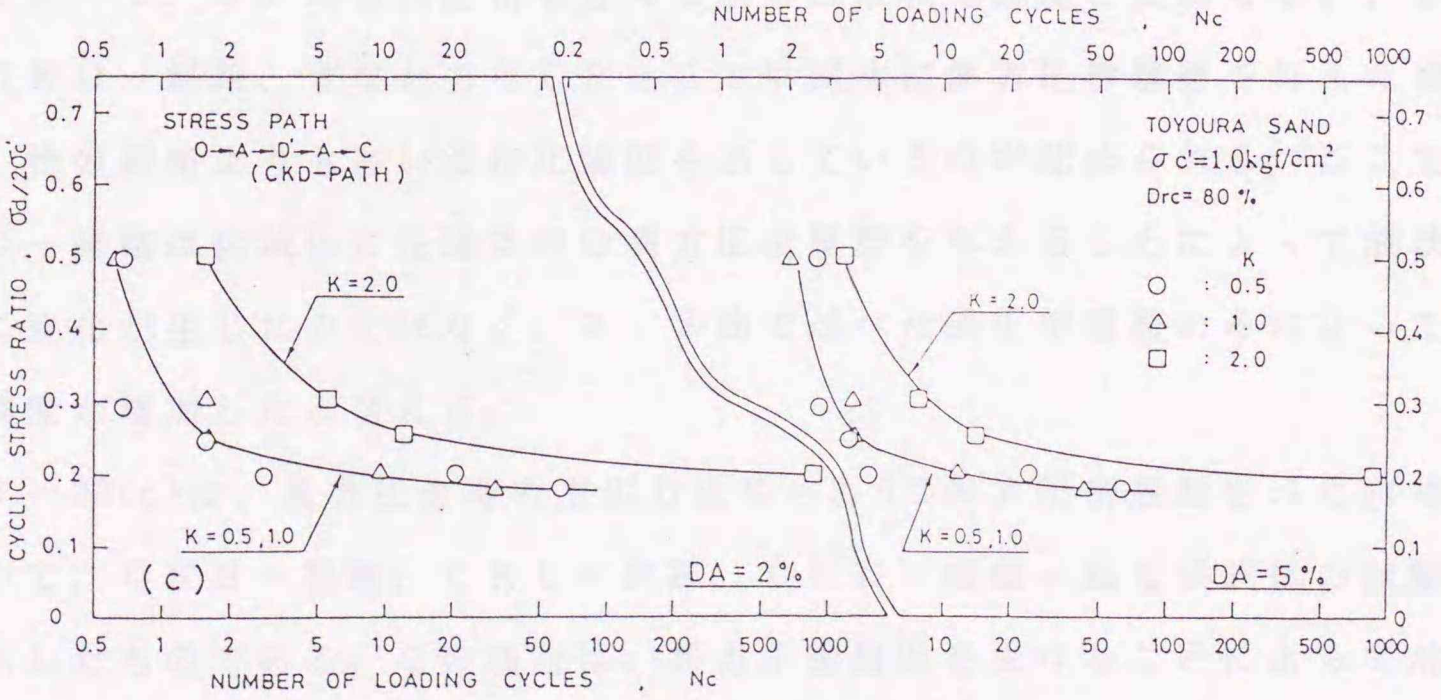


図３－27　異方圧密履歴の影響（ＭＳＰ供試体）
(a)ＣＫＣ－経路(b)ＣＫＢ－経路(c)ＣＫＤ－経路

３．４．２　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３－28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$\sigma d/2\sigma c'$と両振幅軸ひずみＤＡが５％に達するまでの載荷回数Ncとの関係で示したものである。

図３－28(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経路（Ｏ→Ａ→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分かる。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、３．３節でも述べたようにこの経路では、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。

図３－28(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３－28(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。ここで、ＣＫＤ－経路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、３．３節で述べた過圧密履歴のみによって液状化強度が増加したと言える。

図３－28(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}が大きくなるにしたがって、ＣＫＢ－経路（p'_{max}=０．５kgf/cm²）＜ＣＫＣ－経路（p'_{max}=１．０kgf/cm²）＜ＣＫＤ－経路（p'_{max}＝２．０kgf/cm²）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ろう。

このように、異方圧密履歴を受けることによるＭＳＰ供試体の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液状化強度の増加が生ずる。また、Ｋ＜１かつＯＣＲ＝１では液状化強度の増加は生じない。

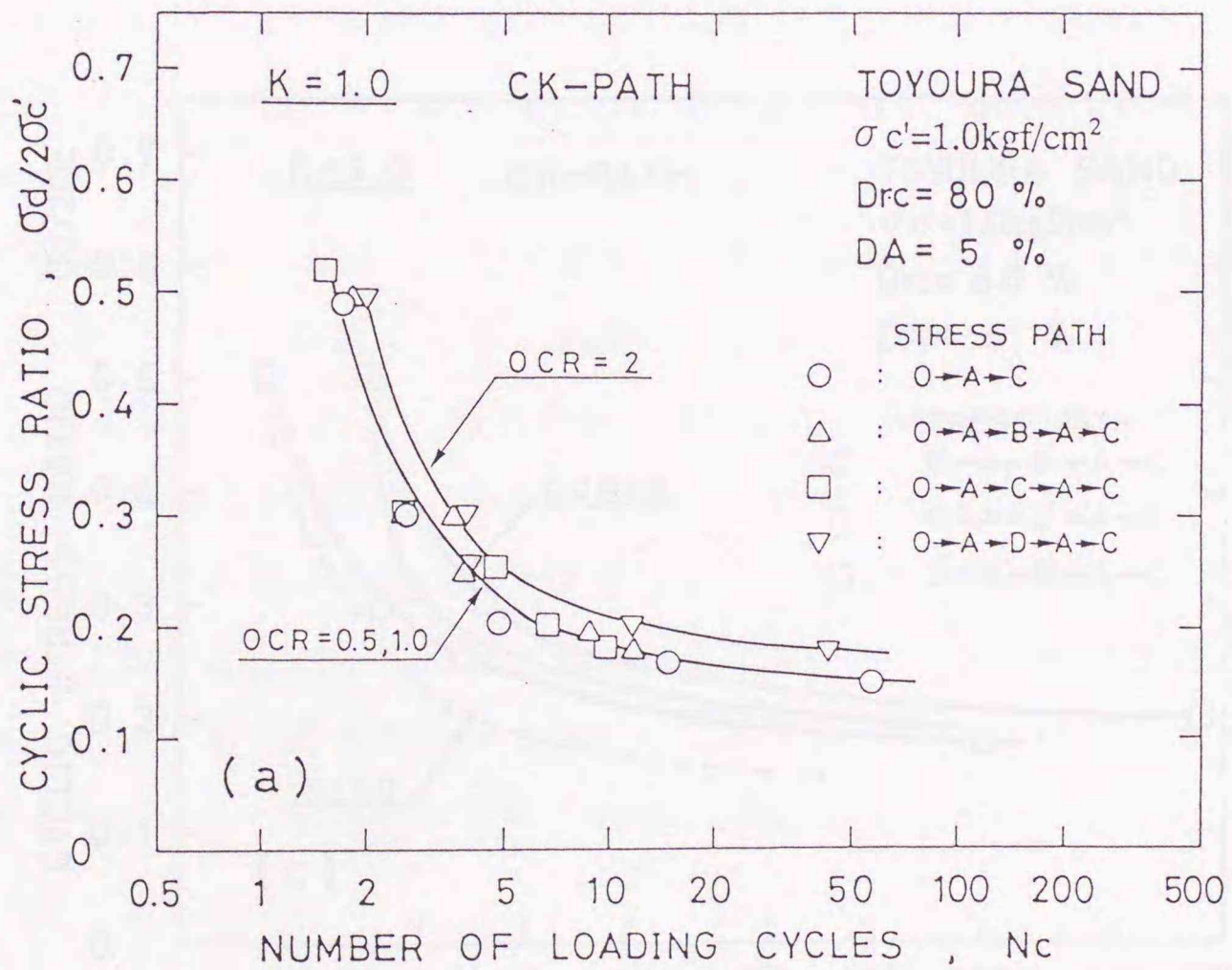
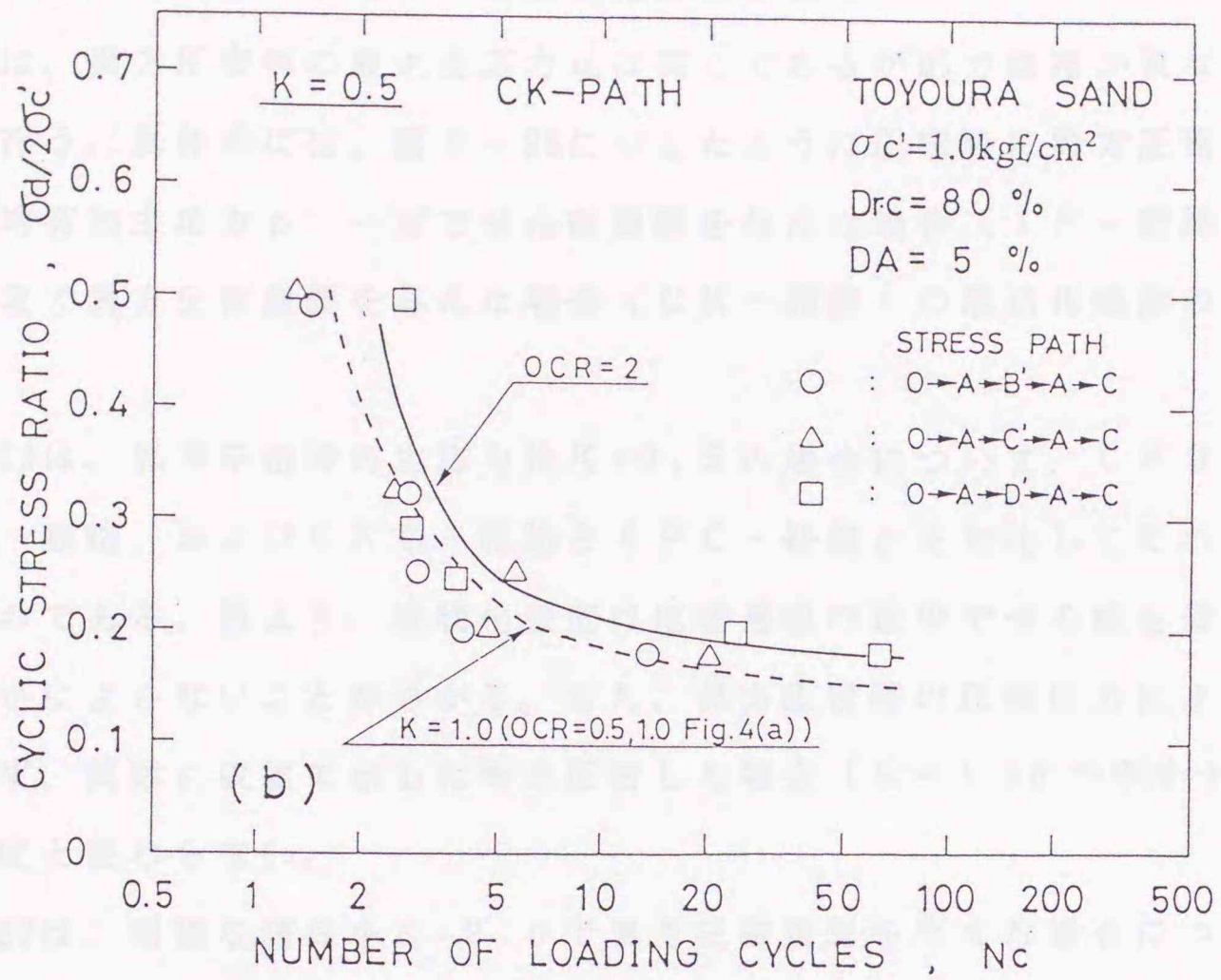


図３－28　異方圧密時の最大平均主応力の影響（ＭＳＰ供試体）
(a)Ｋ＝１．０



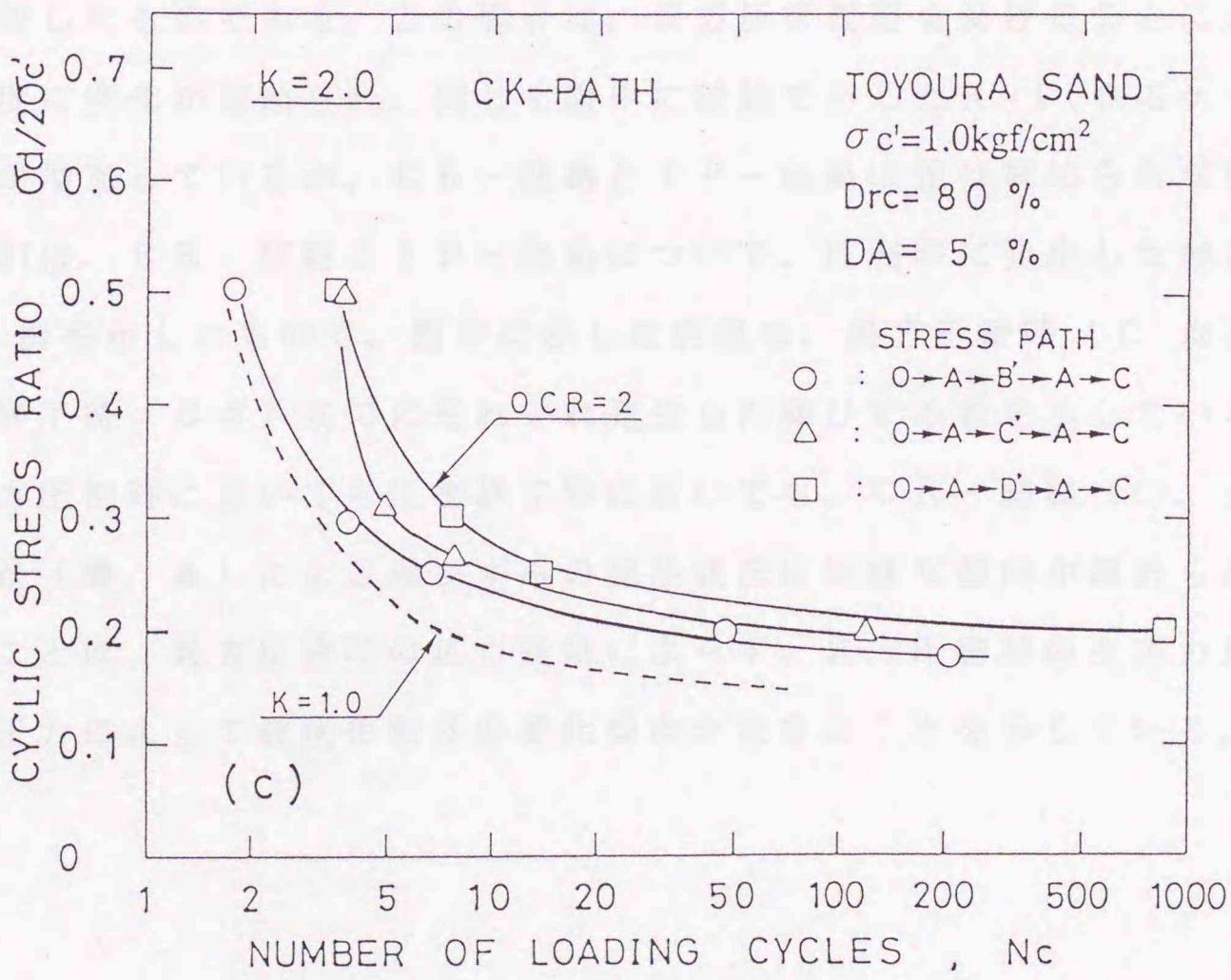


図３－28　異方圧密時の最大平均主応力の影響（ＭＳＰ供試体）
(b)Ｋ＝０．５(c)Ｋ＝２．０

３．４．３　圧密経路の相違による液状化強度の変化

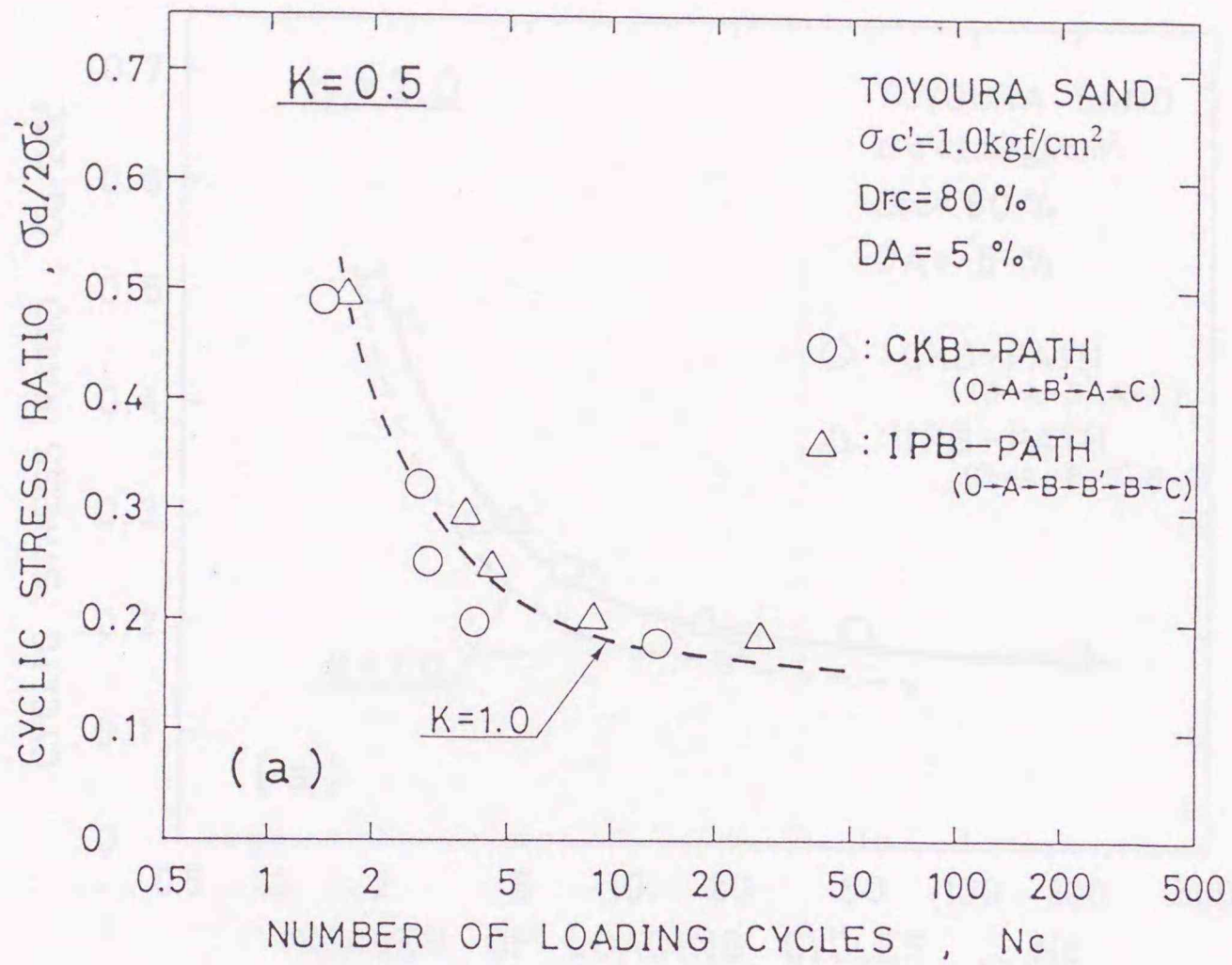
ここでは、異方圧密時の最大主応力比は同じであるが応力経路が異なる場合の比較を行う。具体的には、図３－26に示したように圧密時に等方圧密を行った後、平均有効主応力ｐ’一定でせん断履歴を与えた場合（ＩＰ－経路）と応力比を一定で異方圧密履歴を与えた場合（ＣＫ－経路）の液状化強度の比較を行う。

図３－29は、異方圧密時の主応力比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分かる。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。

図３－30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３－31は、ＣＫ－経路とＩＰ－経路について、圧密時に発生した軸ひずみ$\varepsilon_{a..c}$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。



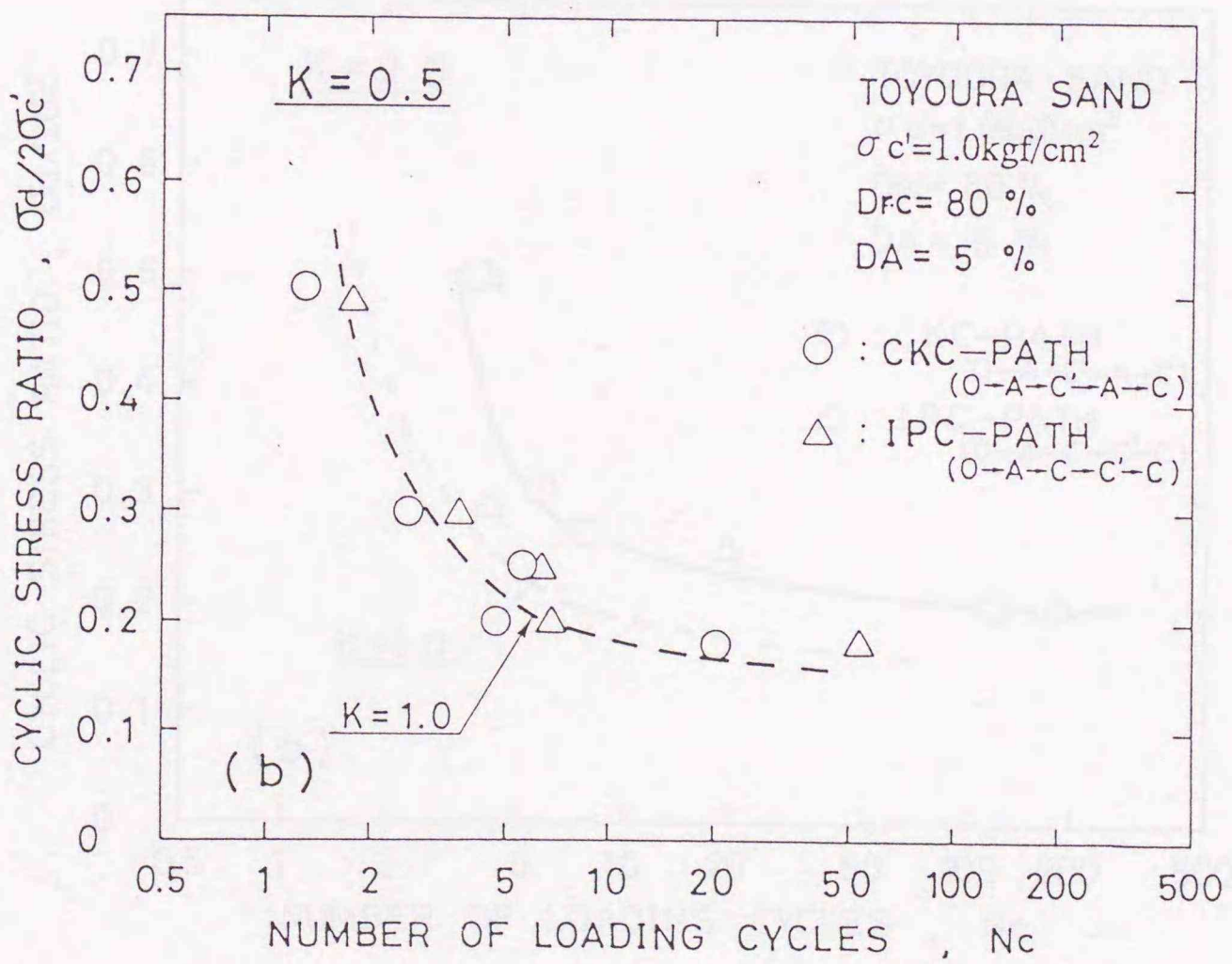
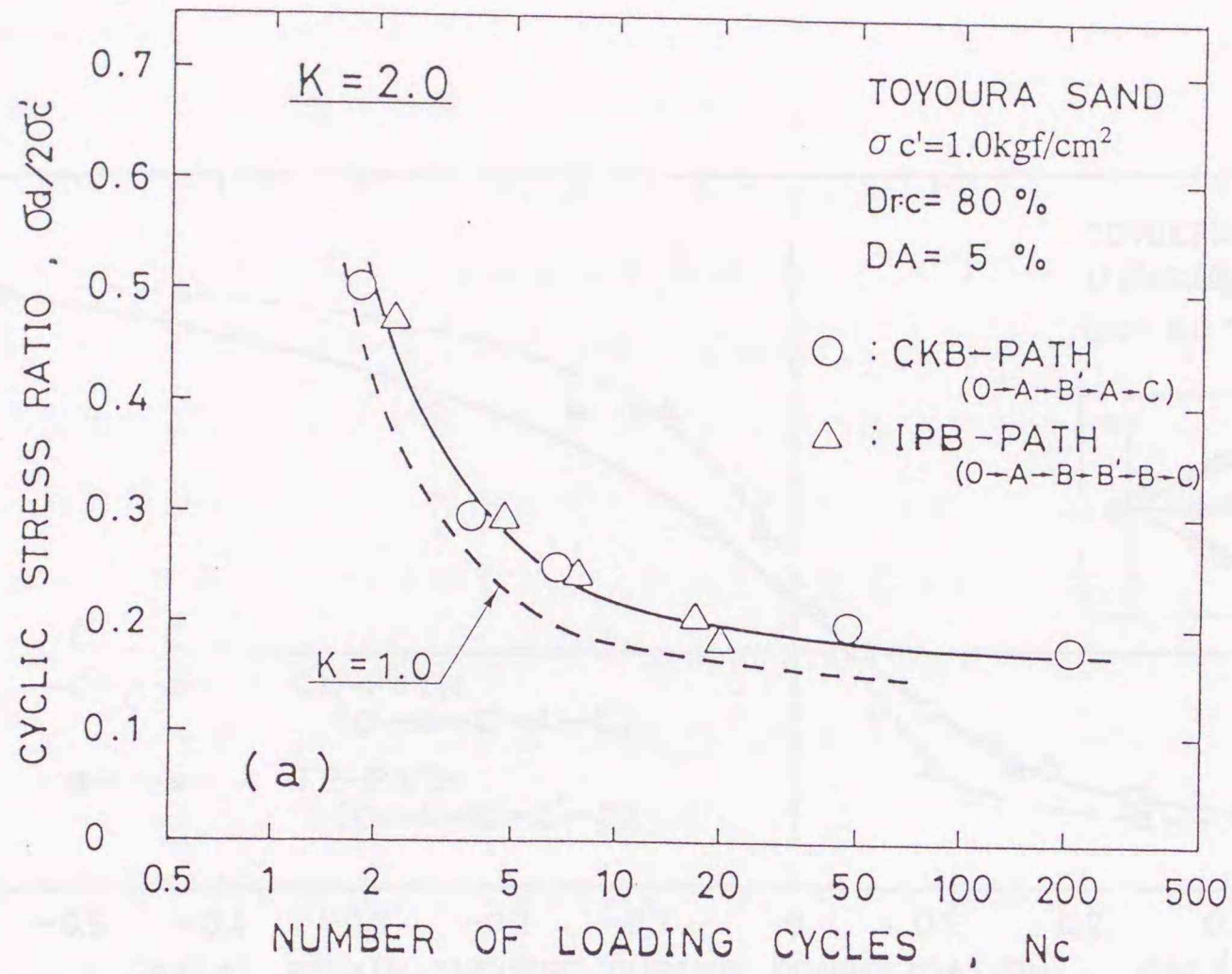


図３－29　圧密経路の影響（ＭＳＰ供試体，Ｋ＝０．５）
(a)ＣＫＢとＩＰＢ経路の比較(b)ＣＫＣとＩＰＣ経路の比較



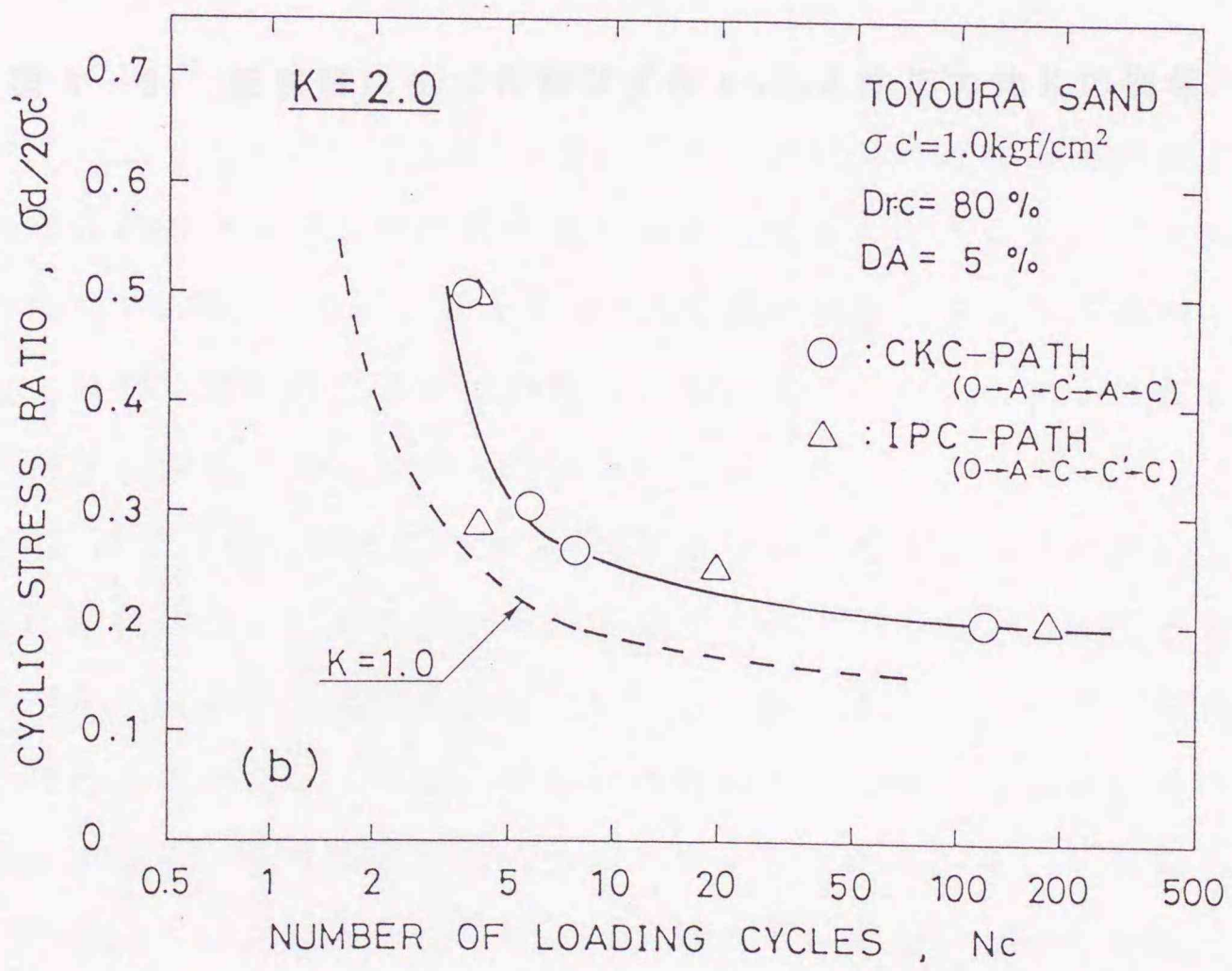


図３－30　圧密経路の影響（ＭＳＰ供試体，Ｋ＝２．０）
(a)ＣＫＢとＩＰＢ経路の比較(b)ＣＫＣとＩＰＣ経路の比較

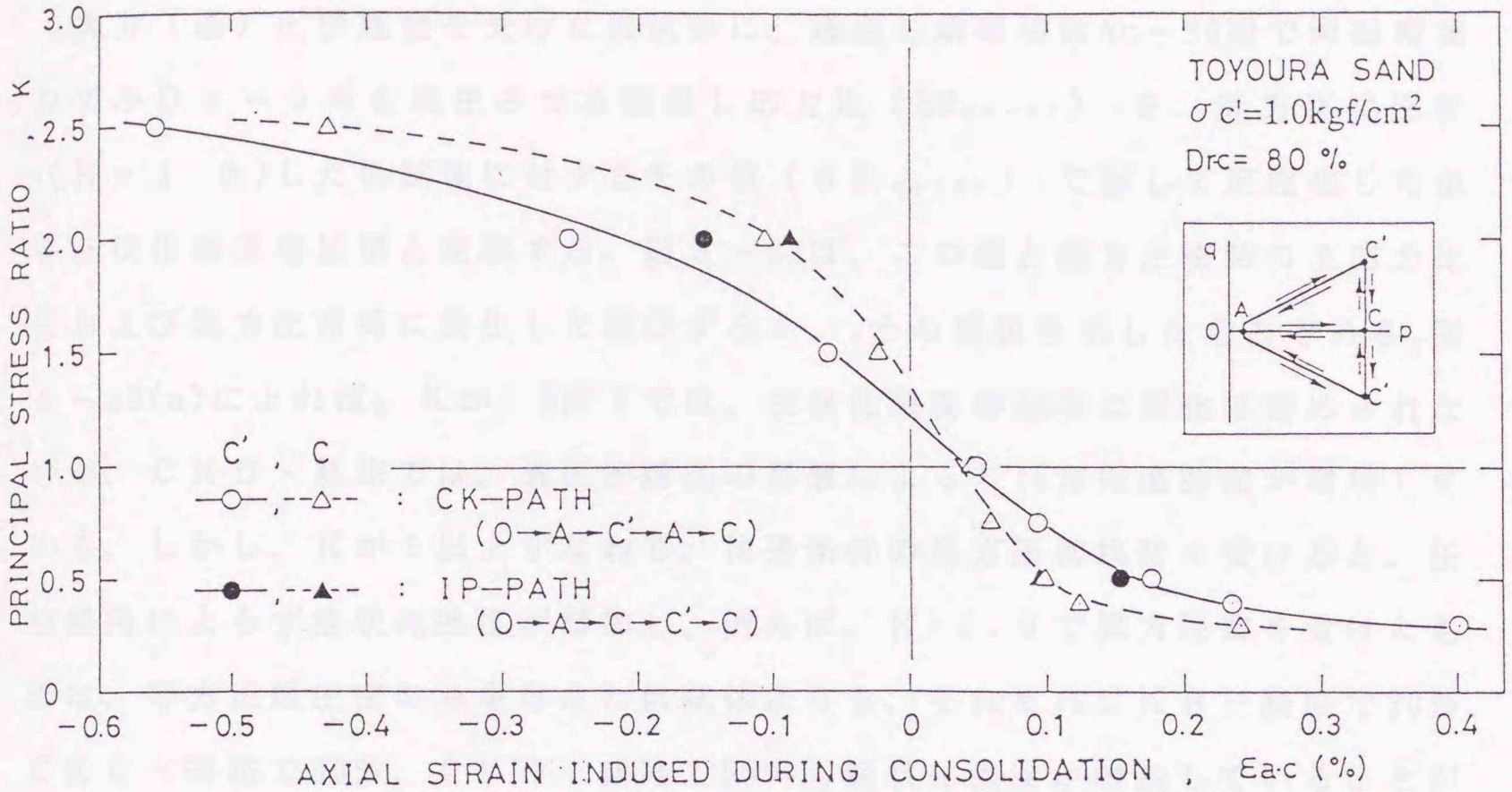


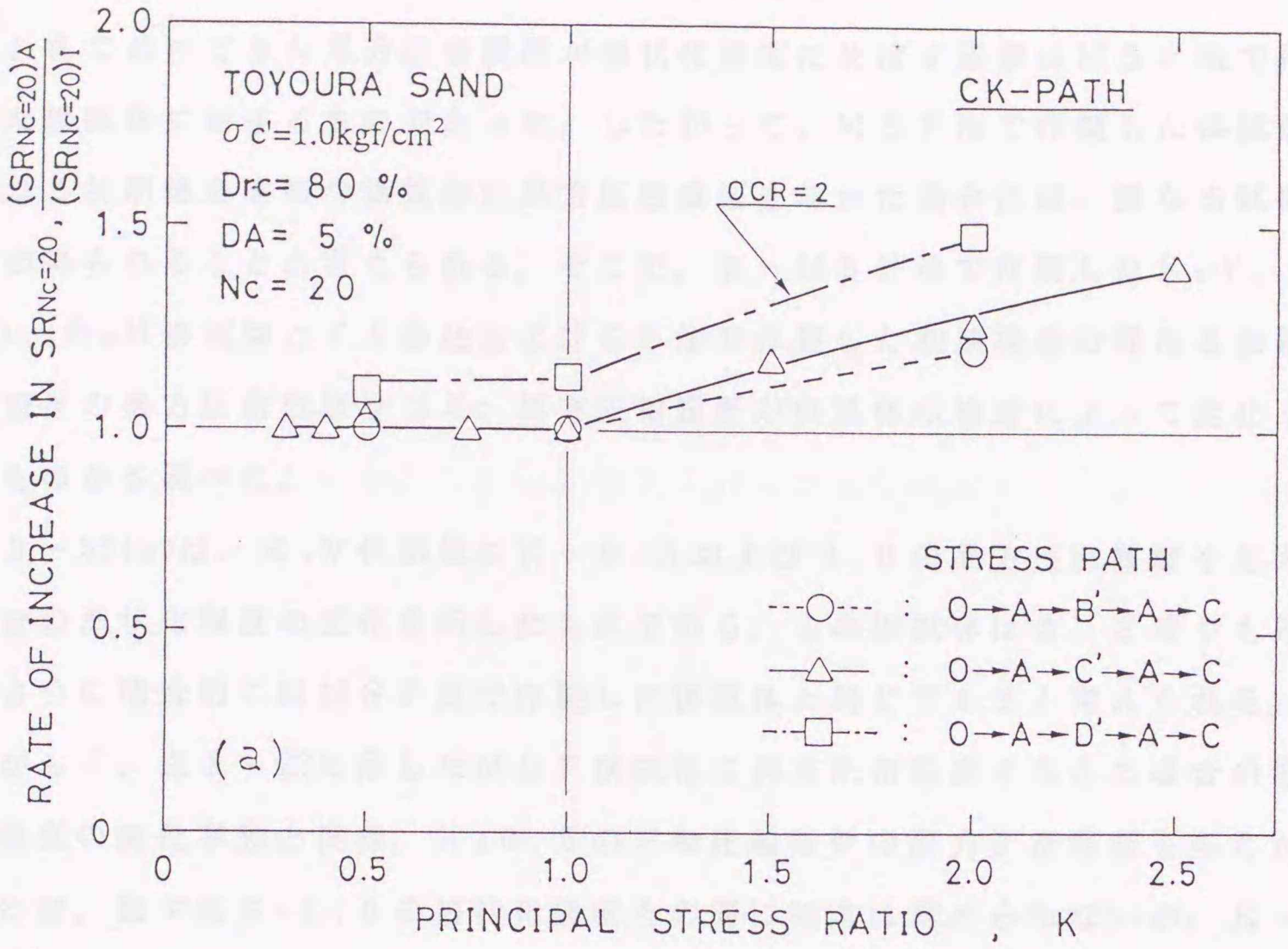
図３－31　圧密時に生じた軸ひずみ $\varepsilon_{a\cdot c}$ と主応力比Ｋの関係

３．４．４　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Nc＝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３－32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$\varepsilon_{a\cdot c}$との関係を示したものである。図３－32(a)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合せと考えられる。Seedら（1977）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３－32(b)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。



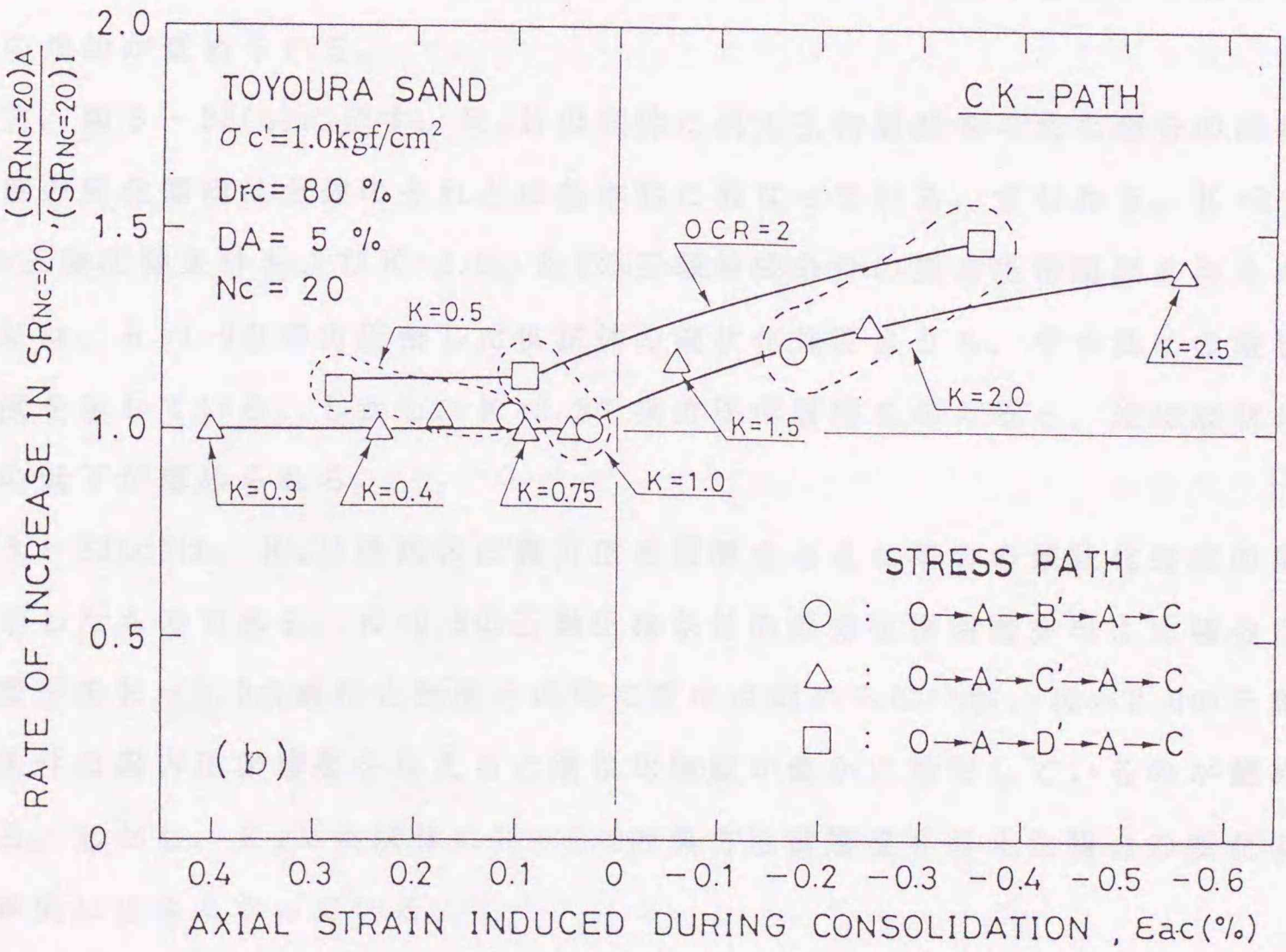


図3－32　液状化強度増加率と(a)Kの関係(b)軸ひずみ $\varepsilon_{a\cdot c}$ の関係
（ＭＳＰ供試体）

３．４．５　初期構造の異なる供試体における比較

これまで述べてきた異方圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響はＭＳＰ法で作製した供試体に対するものであった。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。そこで、Ｓ－ＭＳＰ法で作製したR_BV、R_BD、R_BH供試体とＶＩＢ法およびＣＥ法で作製した初期構造の異なる供試体に種々の異方圧密履歴を与え、異方圧密履歴が供試体の構造によって変化しないものかを調べた。

図３－33(a)は、R_BV供試体にＫ＝０．５および２．０の異方圧密履歴を与えた場合の液状化強度の変化を示したものである。この供試体は３．３節でも述べたように構造的にはＭＳＰ法で作製した供試体と同じであると考えられる。したがって、図３－27に示したＭＳＰ供試体に異方圧密履歴を与えた場合の液状化強度の変化挙動と同様、Ｋ=０．５の三軸圧縮条件の異方圧密履歴を与えた場合には、図中のＫ=１．０の液状化強度との間に相違は認められないが、Ｋ＝２．０の三軸伸張条件の異方圧密履歴を与えると、ＭＳＰ供試体と同様に液状化強度の増加が認められる。

一方、図３－33(b)に示す、R_BH供試体に異方圧密履歴を与えた場合の液状化強度の変化傾向は上述のそれとは基本的に異なっている。すなわち、Ｋ=0.4、0.5の三軸圧縮条件およびＫ=2.0、3.0の三軸伸張条件の異方圧密履歴を与えた場合には、Ｋ=1.0の等方圧密した供試体の液状化強度よりも、やや高めの液状化強度を示している。しかし、Ｋ=0.3の異方圧密履歴を与えると、逆に液状化強度の低下が認められる。

図３－33(c)は、R_BD供試体に異方圧密履歴を与えた場合の液状化強度の変化を示したものである。Ｋ=0.5の三軸圧縮条件の異方圧密履歴を与えた場合には、図中のＫ＝1.0の液状化強度との間に変化は認めらないが、Ｋ＝2.0の三軸伸張条件の異方圧密履歴を与えると液状化強度が僅かに増加しているのが認められる。しかし、R_BV供試体にＫ＝2.0の異方圧密履歴を与えた場合の変化よりも確実に小さくなっている。

また、図３－33(d),(e)にはＶＩＢおよびＣＥ供試体にＫ=0.5，2.0の異方圧密履歴を与えた場合の液状化強度の変化を示している。ＶＩＢ供試体の場合は、

ＭＳＰ供試体に認められたようにＫ=2.0の伸張の履歴を与えた場合のみ液状化強度が増加している。一方、ＣＥ供試体に異方圧密履歴を与えた場合はほとんど液状化強度に変化が認められない。

このように、異方圧密履歴によってもたらされる液状化強度の変化は、供試体の初期構造によって著しく異なっている。言いかえると、異方圧密時の主応力比Ｋが等しくとも、その供試体が持つ初期構造異方性によって影響の仕方は異なることが分かる。

これらの液状化強度の変化の程度を図３－32と同様に定量的に比較したのが図３－34である。図では、異方圧密した供試体が繰返し載荷回数Ｎc=１０回で両振幅軸ひずみＤＡ＝５％を発生させる繰返し応力比を等方圧密した場合のその値で除して定義した液状化強度増加率（$(SR_{Nc=10})_{ANI}/(SR_{Nc=10})_{ISO}$）と、異方圧密時の主応力比Ｋとの関係を、ＭＳＰ，$R_BV$，$R_BD$，$R_BH$供試体について示している。図によれば、Ｋが１．０以下の三軸圧縮条件の異方圧密履歴を受けた場合には、R_AV、R_BV、R_BD供試体では液状化強度に変化は認められない。それに対し、R_BH供試体では、Ｋ=0.4、0.5の異方圧密履歴を受けると強度がやや増加しているが、Ｋ=0.3の異方圧密履歴を受けた場合、15％程度強度が低下している。一方、Ｋが1.0以上の、三軸伸張条件の異方圧密履歴を受けると、主応力比Ｋが大きいほど、またR_BV、R_BD、R_BH供試体の順に液状化強度が大きくなっている。また、R_BV供試体の液状化強度増加率は、R_AV供試体と同程度となっている。

また、図３－35は強度増加率と異方圧密時（Ｋ＝1.0の等方圧密を含む）に発生した軸ひずみ$\varepsilon_{a\cdot C'}$（％）（図３－26のＡ→Ｃ'(Ｃ)間でのひずみ量）との関係を示したものである。この図から、供試体の初期構造の違いによって程度の差はあるものの、伸張のひずみ履歴が与えられると液状化強度が増加するのに対して、圧縮方向に同程度のひずみ履歴を与えても、伸張ひずみを受けた場合ほどの変化は認められないと言えよう。

初期構造が異なることによって液状化強度に及ぼす異方圧密履歴の影響が異なることが示されたが、その原因は、以下のように考えられる。

液状化は繰返し載荷によって間隙水圧が発生し有効応力が低下するため起きる現象である。したがって、液状化強度は供試体のダイレタンシー特性に密接

に関係していることは明らかである。また、３．２節でも説明したように三軸試験による液状化強度は繰返し載荷時の三軸圧縮または伸張条件下の変形特性と密接に関係していることも挙げられる。したがって、異方圧密履歴を受けた供試体の液状化強度は異方圧密履歴によるダイレタンシー特性の変化と変形特性の変化に依存していると思われる。

図３－36は、異方圧密時（図３－26のＡ→Ｃ'(C)間）に発生した体積ひずみ$\varepsilon_{v\cdot c'}$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。ここで、図３－36(a)はＭＳＰおよびＳ－ＭＳＰ法で作製した中実供試体に対して、図３-36(b)はＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法で作製した中空供試体に対して示している。また、図３－37は等方圧密した各供試体の繰返し載荷時の軸ひずみの発生状況を示したものである。図３－36において、等方圧密(Ｋ=1.0)した場合に生じた体積ひずみ量を比較すると、メンブレン貫入量の差のため凍結供試体(Ｒ$_B$Ｖ、Ｄ、Ｈ供試体およびＣＥ供試体)の体積ひずみ量は非凍結供試体(ＭＳＰおよびＶＩＢ供試体)よりも大きくなっている。しかし、図３－36(a)に示すＭＳＰ供試体とＲ$_B$Ｖ供試体を比較するとＫに対しては同様に変化している。すなわち、Ｋが1.0以下では等方圧密した場合よりもやや体積収縮量が少なく、それほど差はないが、Ｋ=1.0以上では圧密中の体積収縮量が、等方圧密時よりも大きくなっている。したがって、等方圧密した供試体よりも圧密時に体積収縮が進行しているため、非排水繰返し載荷時において正の間隙水圧の発生を抑制するような構造変化をもたらされたと考えられる。また、図３－37に示したように、ＭＳＰおよびＲ$_B$Ｖ供試体は伸張方向に変形し易い供試体である。したがって、伸張方向の異方圧密履歴を受けた場合、３．４．１でも述べたように、等方圧密した供試体に比べ伸張条件の異方圧密履歴を与えると伸張応力条件に対する剛性が高くなり、繰返し載荷時の変形特性は全体の変形量に対して伸張時の変形割合が等方圧密供試体よりも減少すると考えられる。繰返し三軸試験は伸張時の変形特性に大きく依存することから、伸張方向の変形割合が減少することによって液状化強度が増加した一因でもあると言える。

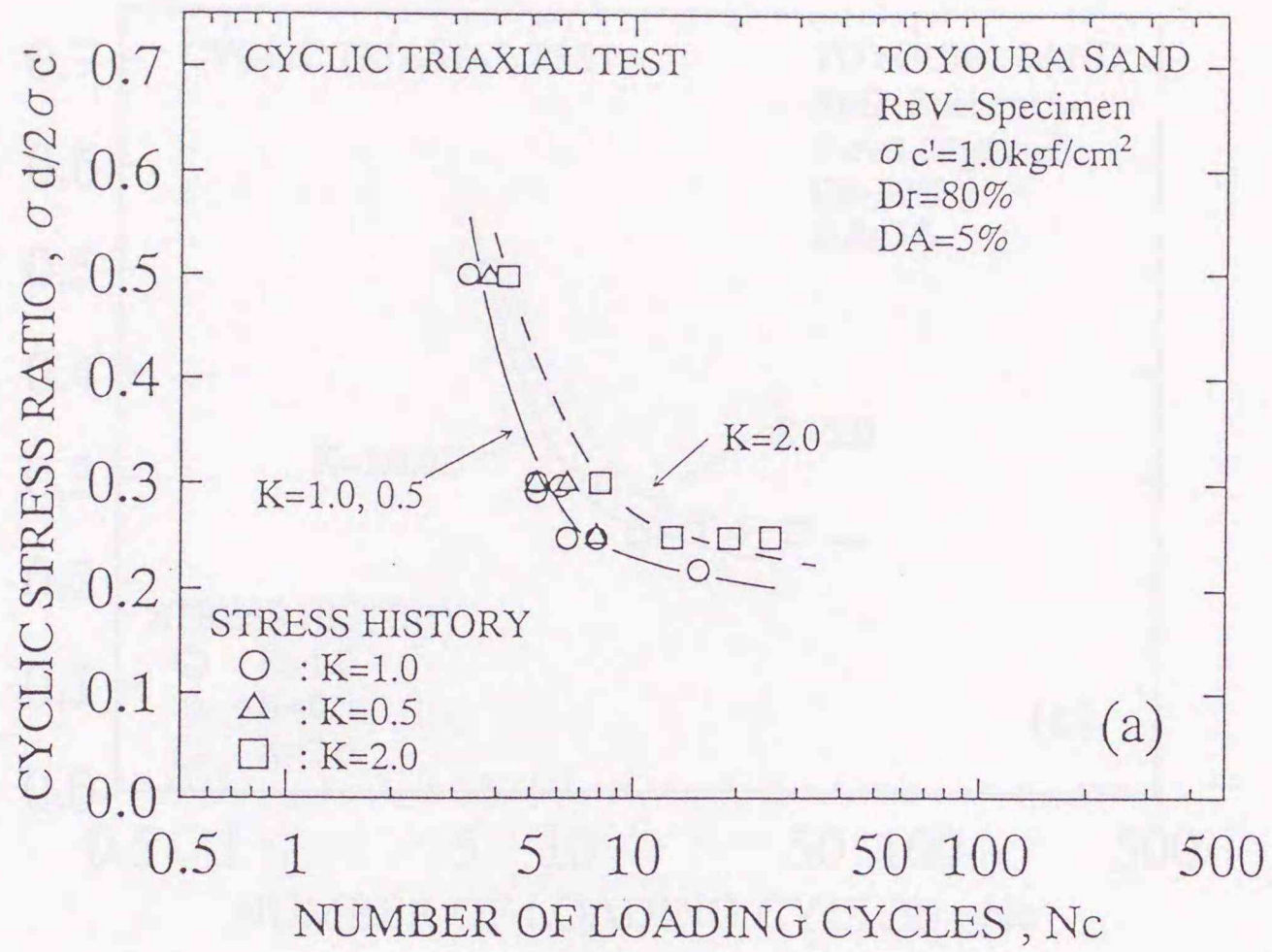
それに対して、Ｒ$_B$Ｈ供試体においてはＫ＝1.0以上での体積ひずみ量は、等方圧密した場合よりもやや大きくなっているが、ＭＳＰ、Ｒ$_B$Ｖ供試体程大きくないため液状化強度の変化が少なかったと言える。ただし、Ｋ=0.3の三軸圧縮

条件の異方圧密履歴を受けた場合には、等方圧密時よりも体積ひずみ量が小さく、また図３－35からも理解されるように、圧縮方向に大きなひずみ履歴を受けているため、繰返し載荷時に伸張方向に変形し易くなり、そのため強度が低下したと考えられる。

また、R_BD供試体ではK＝1.0以上の異方圧密履歴を受けた場合の体積ひずみは、R_BV供試体とR_BH供試体の中間的な値となっている。繰返し載荷時の軸変形特性も伸張時の変形割合も$R_BV > R_BD > R_BH$の順になっている。このため、K＝2.0の異方圧密履歴を受けた場合の液状化強度増加は、R_BV供試体よりも小さくなったと考えられる。このように、三軸伸張条件下での変形量および伸張方向の異方圧密時の体積ひずみ量が大きいR_BV、R_BD、R_BH供試体の順に液状化強度も高くなっている。

また、図３-35(b)に示すＶＩＢ供試体においてはＭＳＰ供試体ほどではないがK=2.0の伸張履歴を受けた方が体積ひずみが大きくなっていること、軸変形特性はR_BD供試体のそれと同程度であることからも、伸張履歴を受けることによって液状化強度が増加したと考えられる。

一方、ＣＥ供試体の場合は異方圧密履歴を与えた場合の体積ひずみは、等方圧密した場合の体積ひずみにほぼ等しいかやや少なくなっている。また、繰返し載荷時の変形特性は圧縮方向にやや大きい程度で、R_BD供試体とR_BH供試体のほぼ中間的な変形特性を示している。これらのことから、ＣＥ供試体においては、異方圧密履歴がその後のダイレタンシー特性に及ぼす影響は他の供試体よりも小さいこと、図３－１に示したようにR_BD供試体とR_BH供試体の液状化強度はほぼ等しいので、繰返し載荷時の変形特性がある程度変化しても変形特性の相違によって液状化強度は変化しないと考えられることから、異方圧密履歴の影響が現れなかったと考えられる。



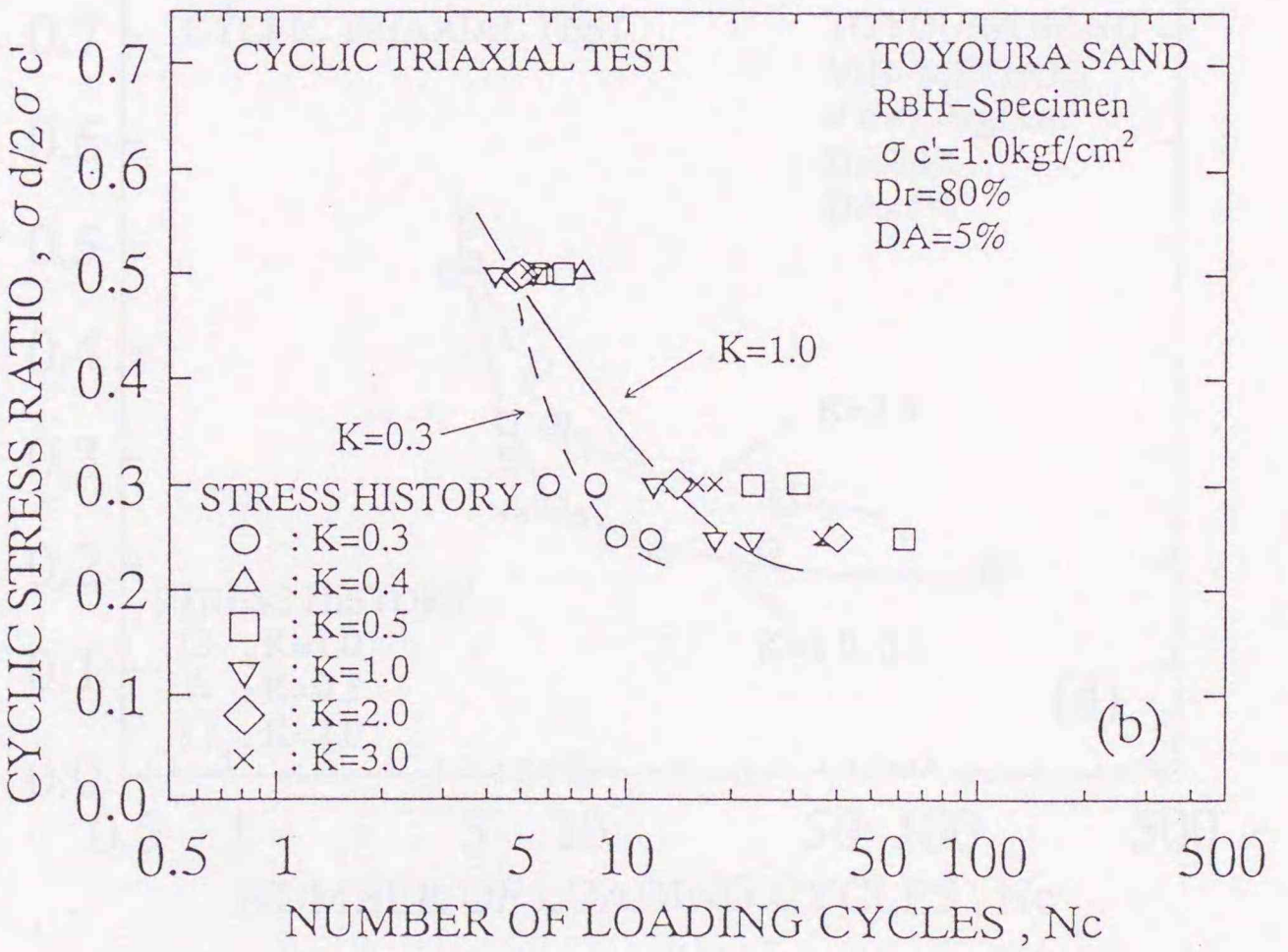
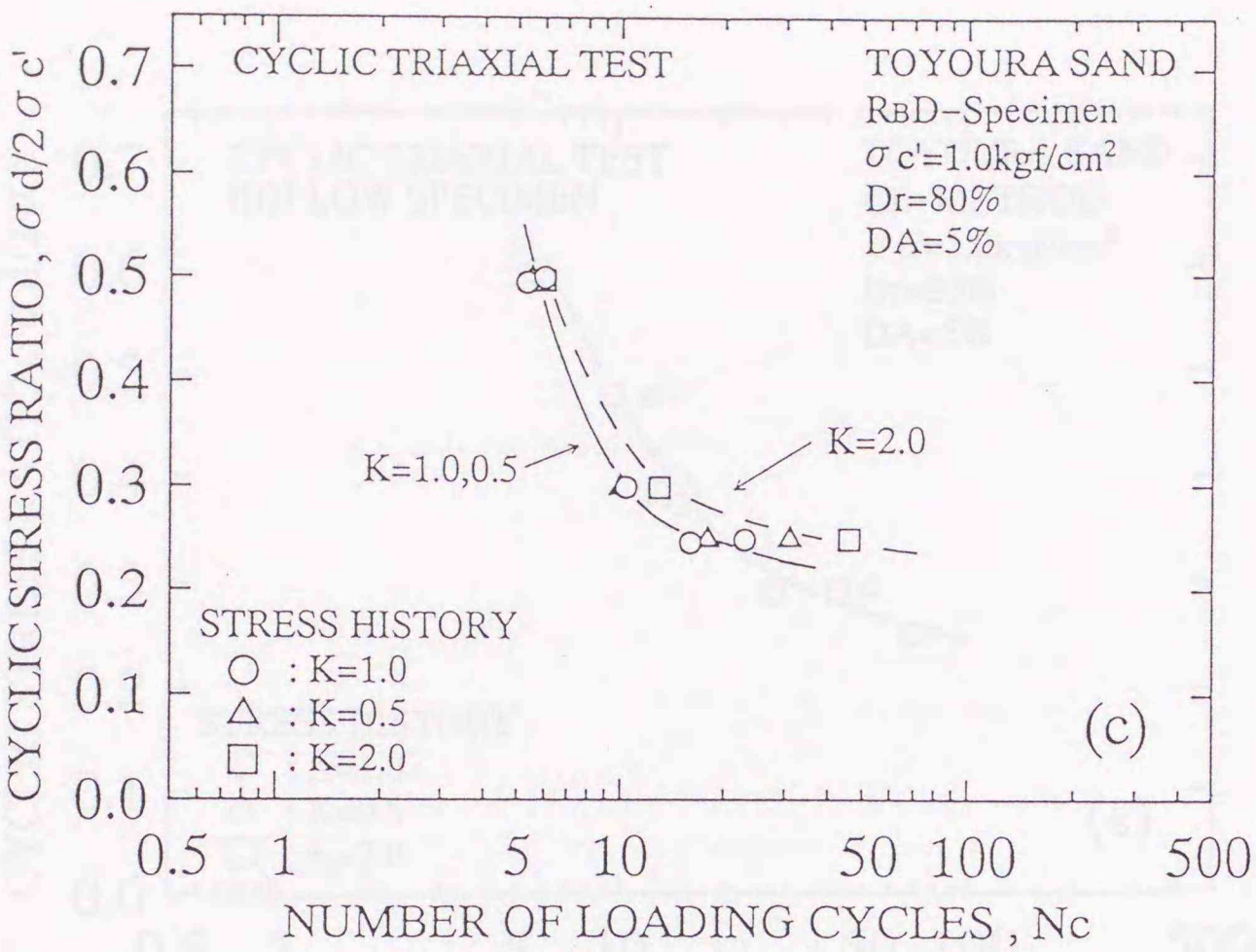


図 3 − 33　異方圧密履歴の影響(a)RBV供試体(b)RBH供試体



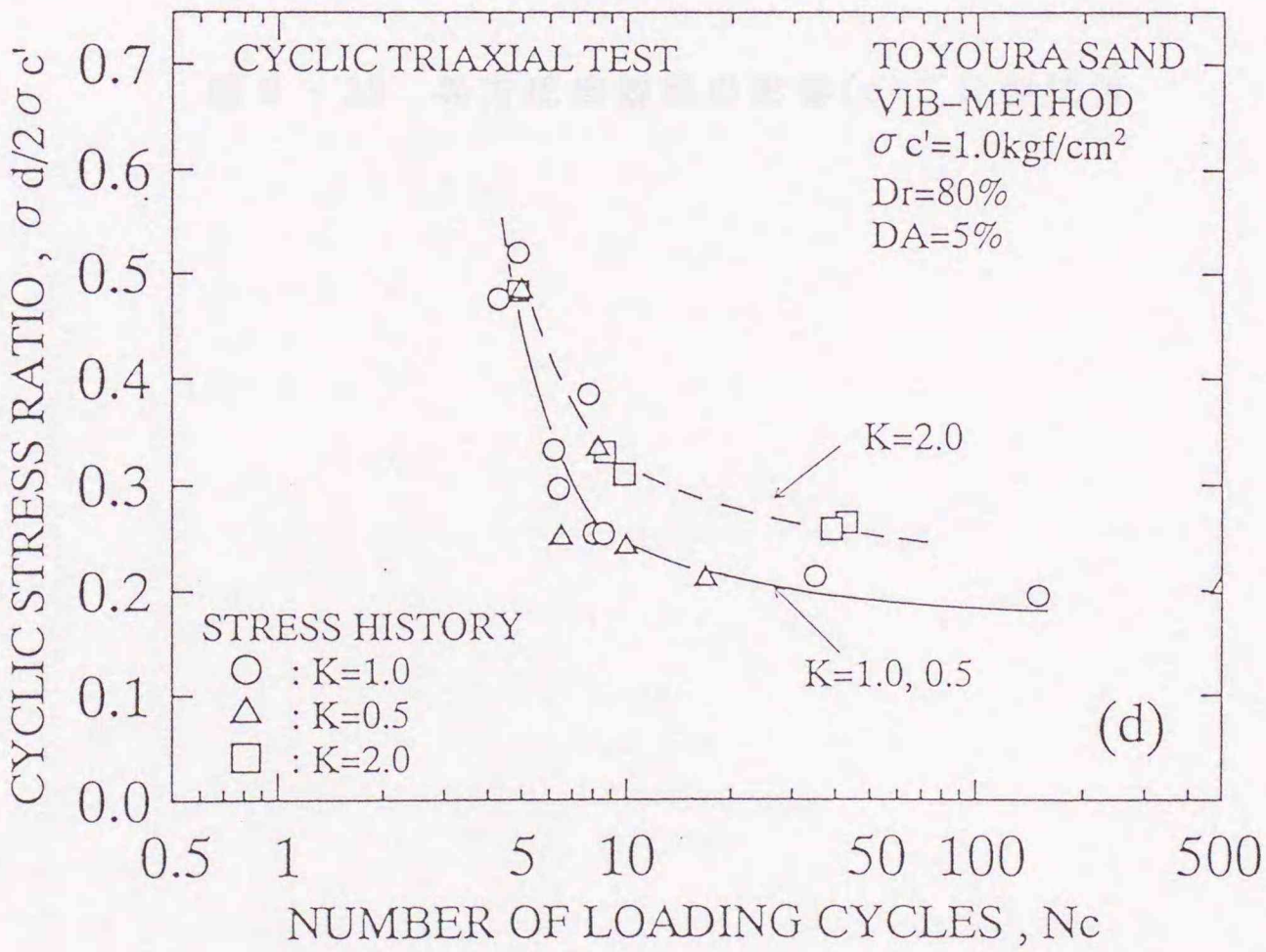


図 3 － 33　異方圧密履歴の影響(c)RBD供試体(d)ＶＩＢ供試体

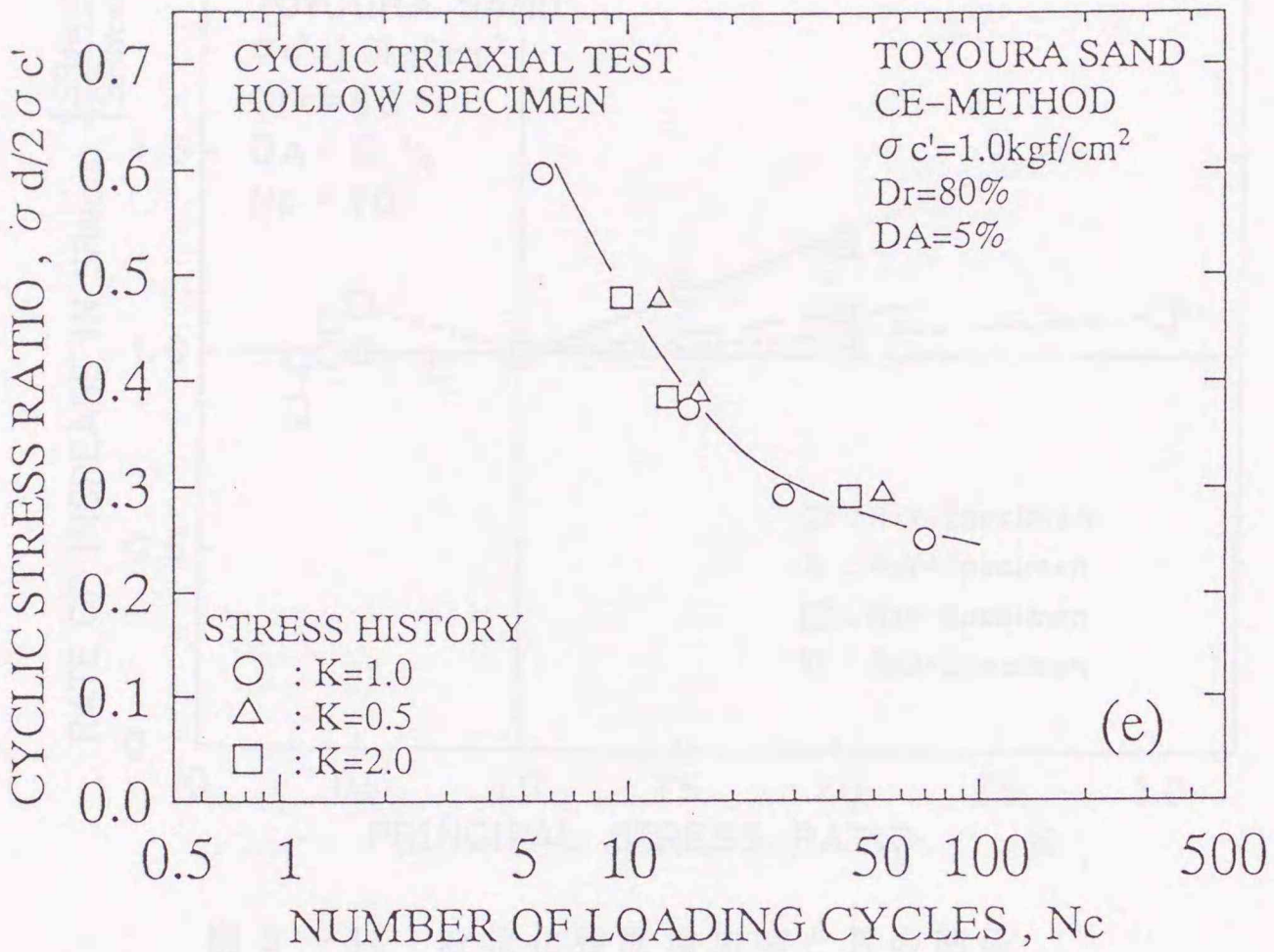


図 3 － 33　異方圧密履歴の影響(e)ＣＥ供試体

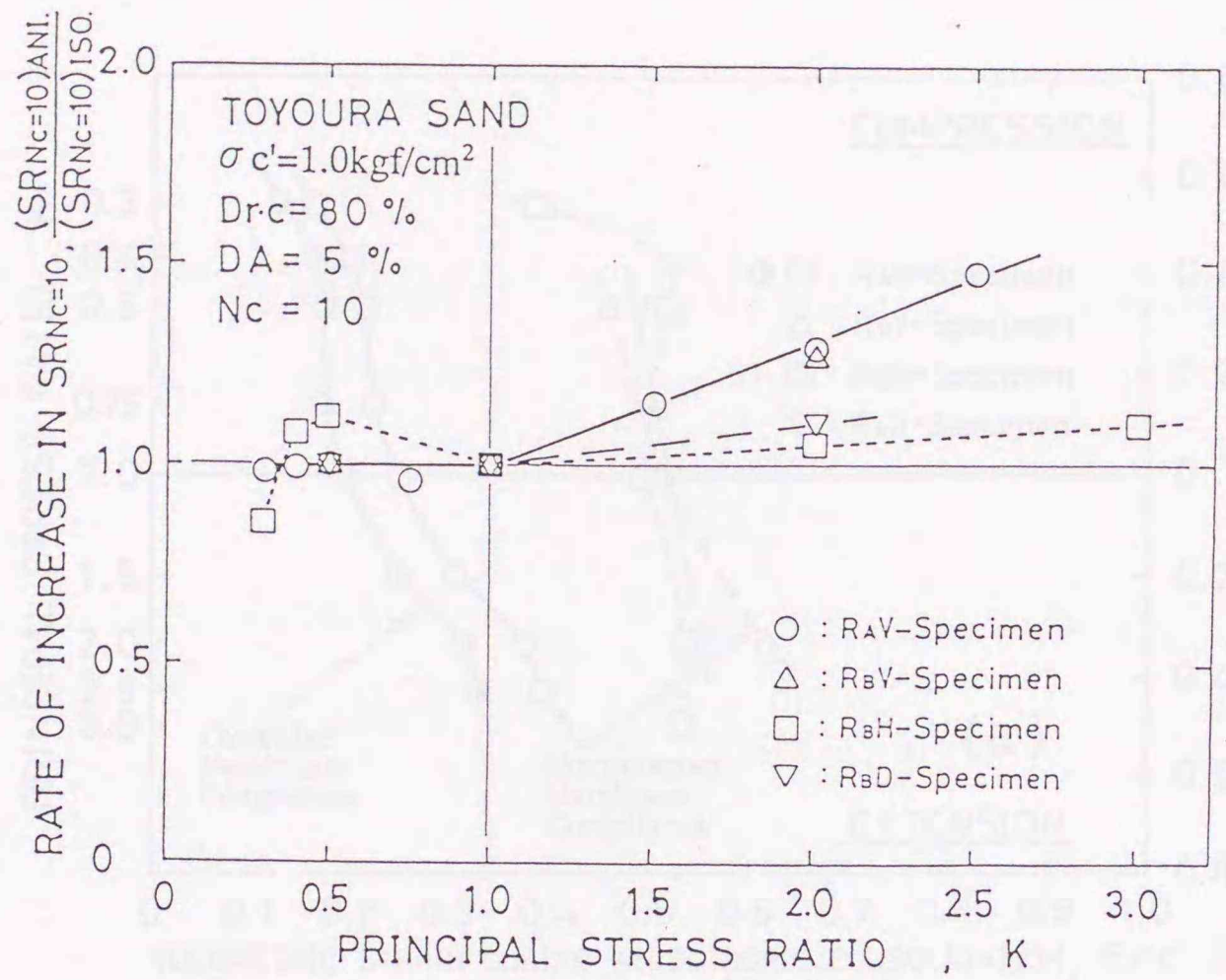


図３－34　液状化強度増加率とＫの関係
（ＭＳＰ，R_BＶ，R_BＨ供試体，R_BＤ供試体）

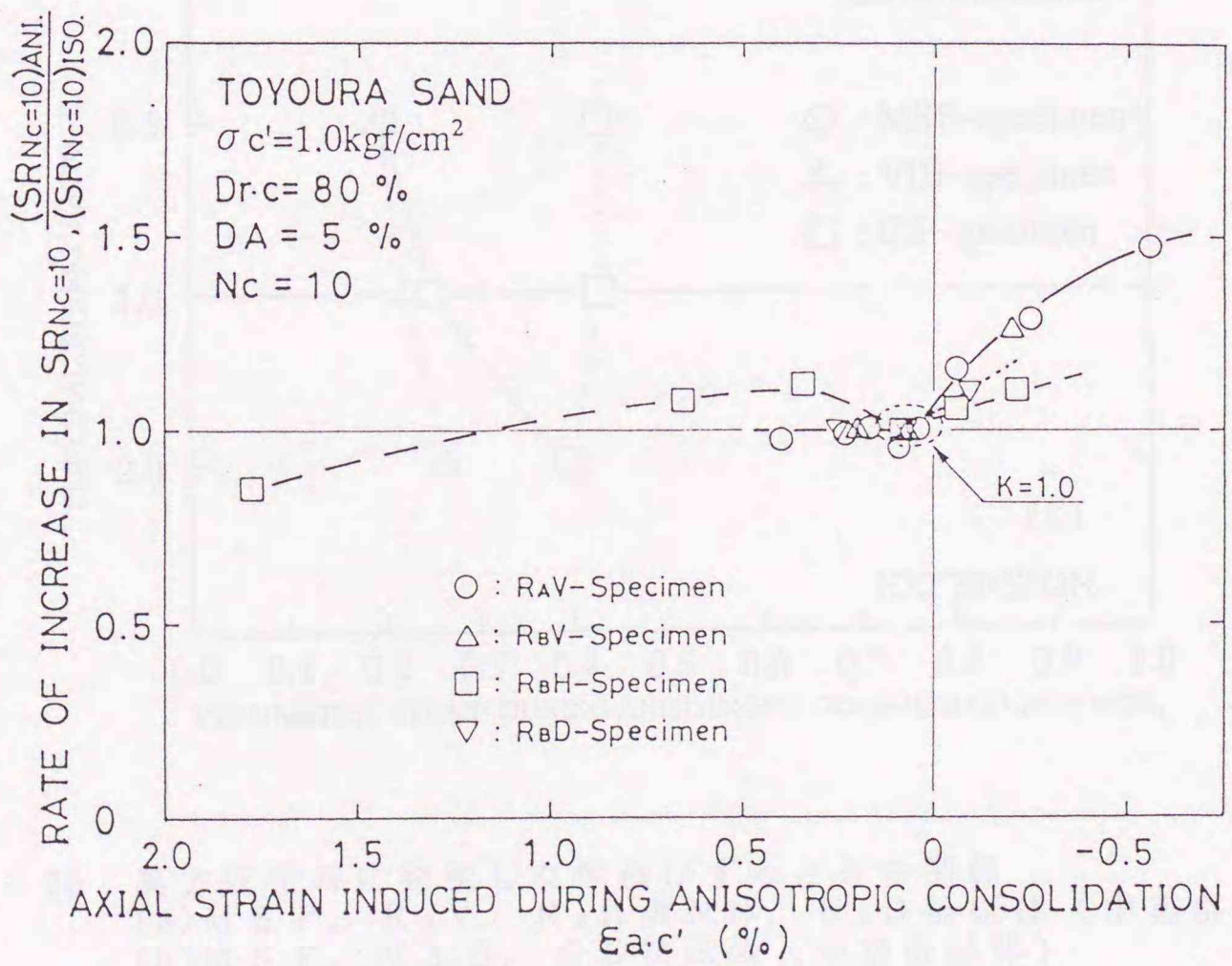
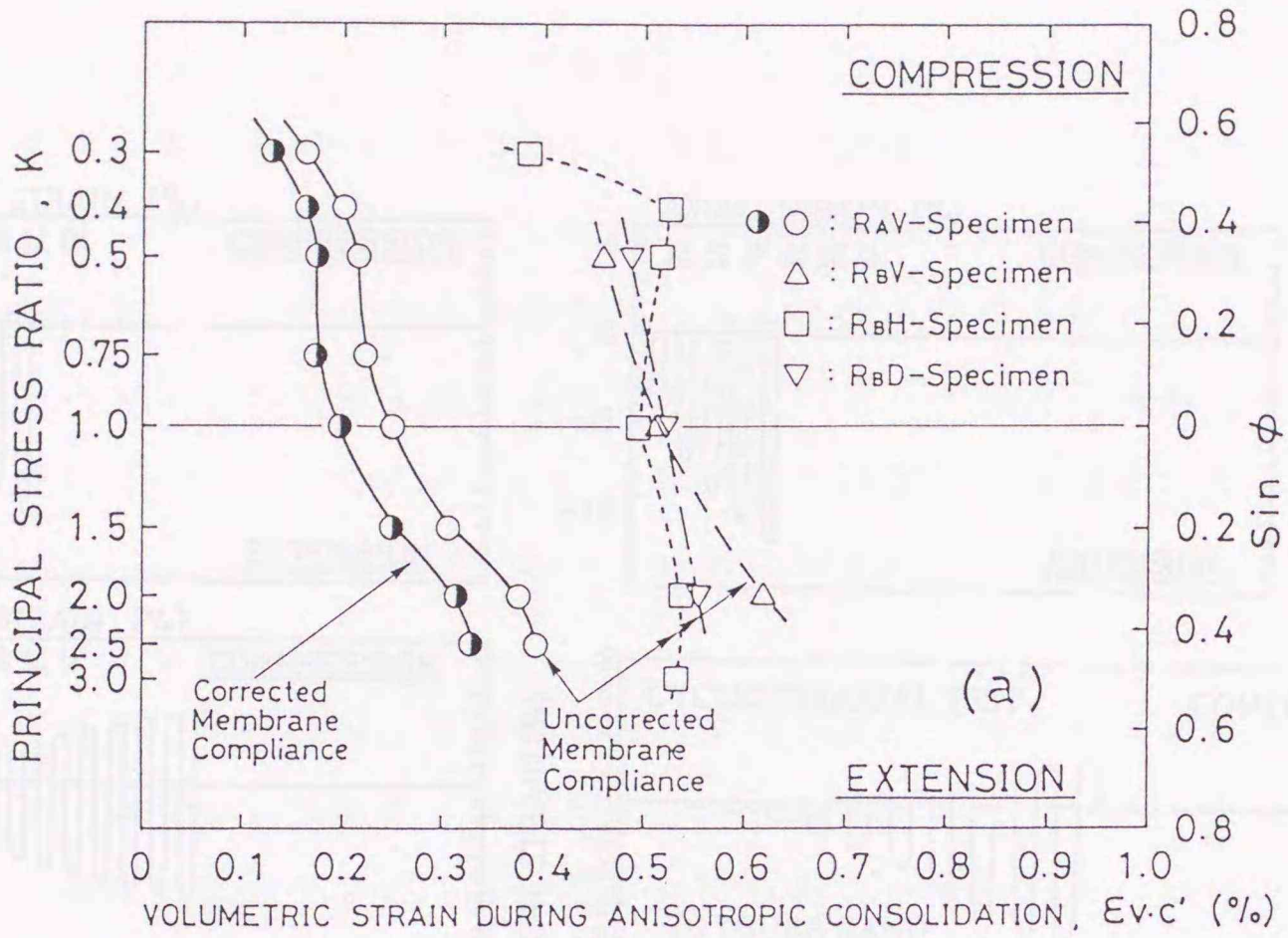


図３－35　液状化強度増加率と軸ひずみ$\varepsilon_{a\cdot c}$の関係
（ＭＳＰ，R_BＶ，R_BＨ供試体，R_BＤ供試体）



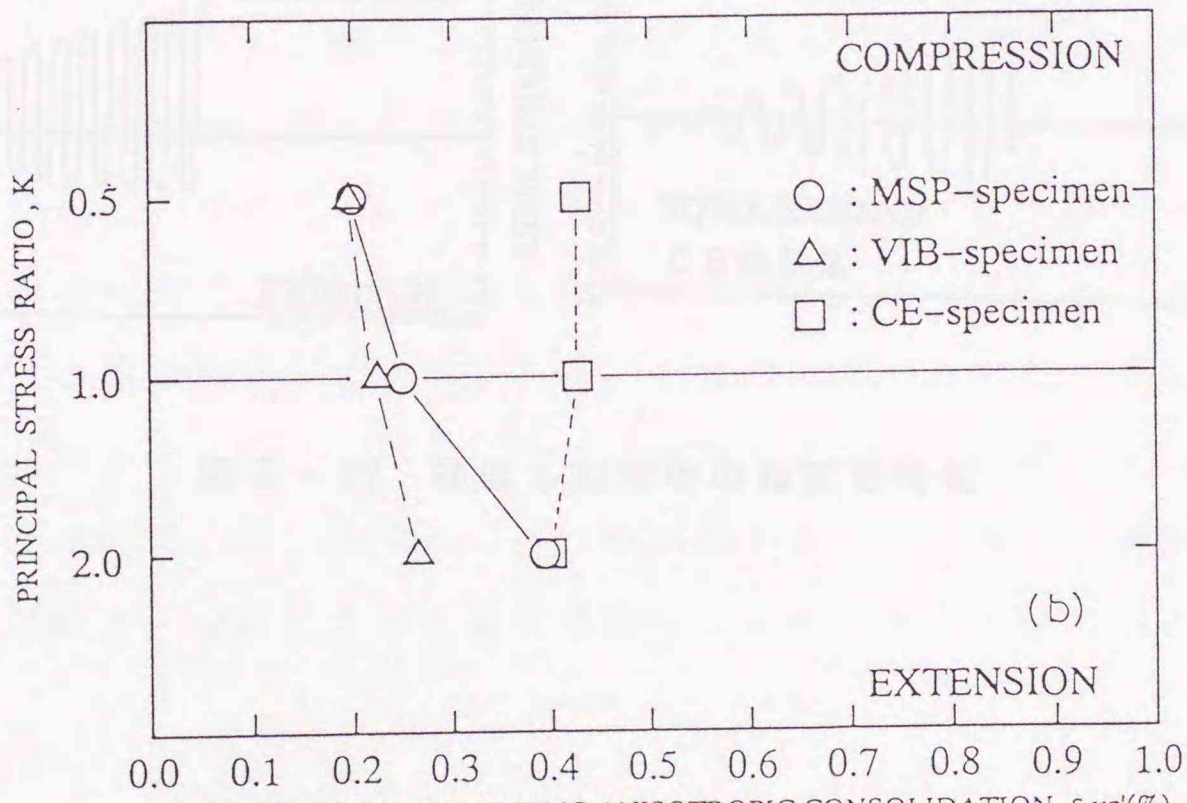


図３－36　異方圧密時に発生した体積ひずみとＫの関係
(a)ＭＳＰ，ＲBＶ，ＲBＨ供試体，ＲBＤ供試体（中実供試体）
(b)ＭＳＰ，ＶＩＢ，ＣＥ供試体（中空供試体）

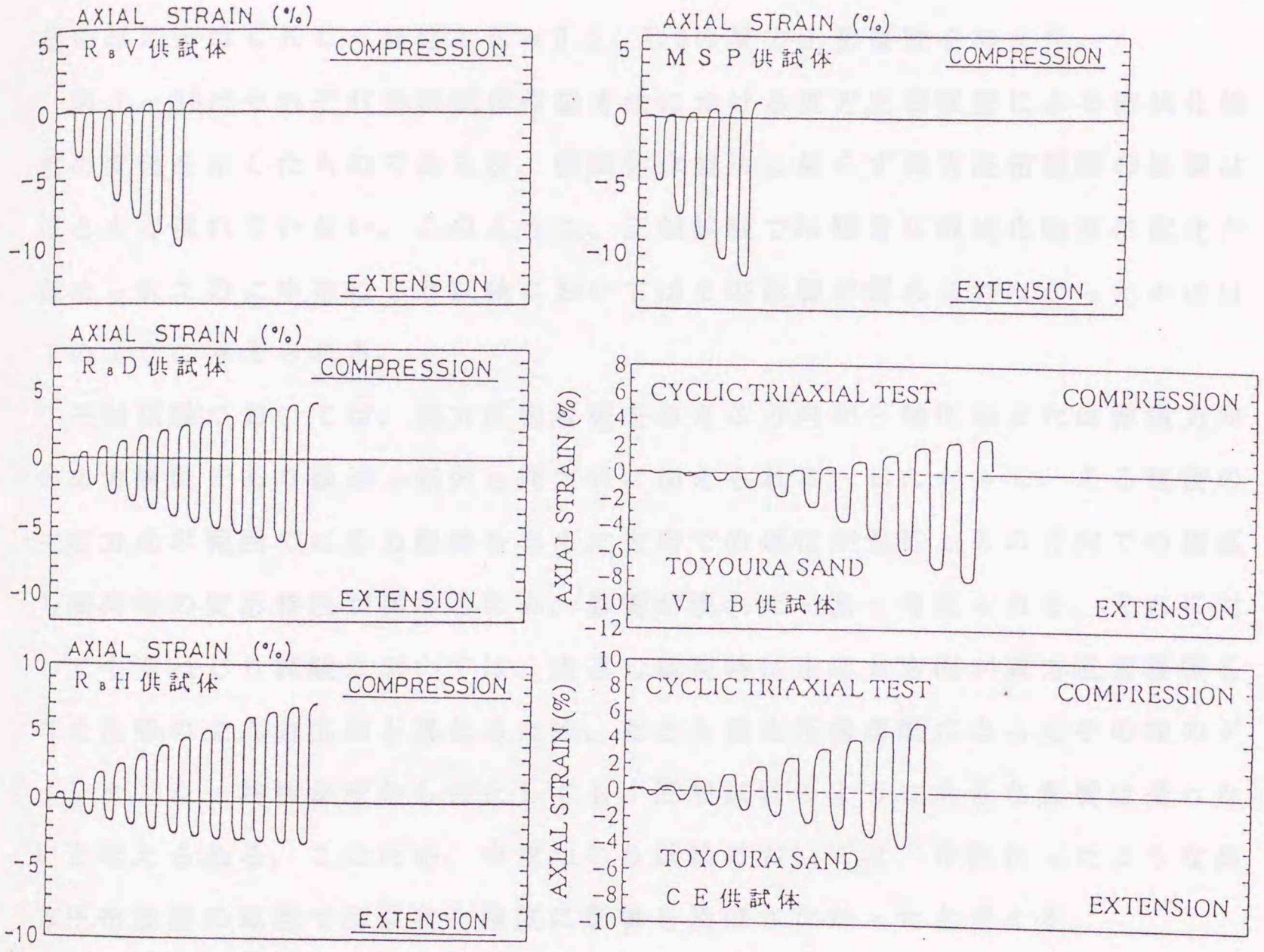


図 3 － 37　繰返し載荷時の軸変形特性

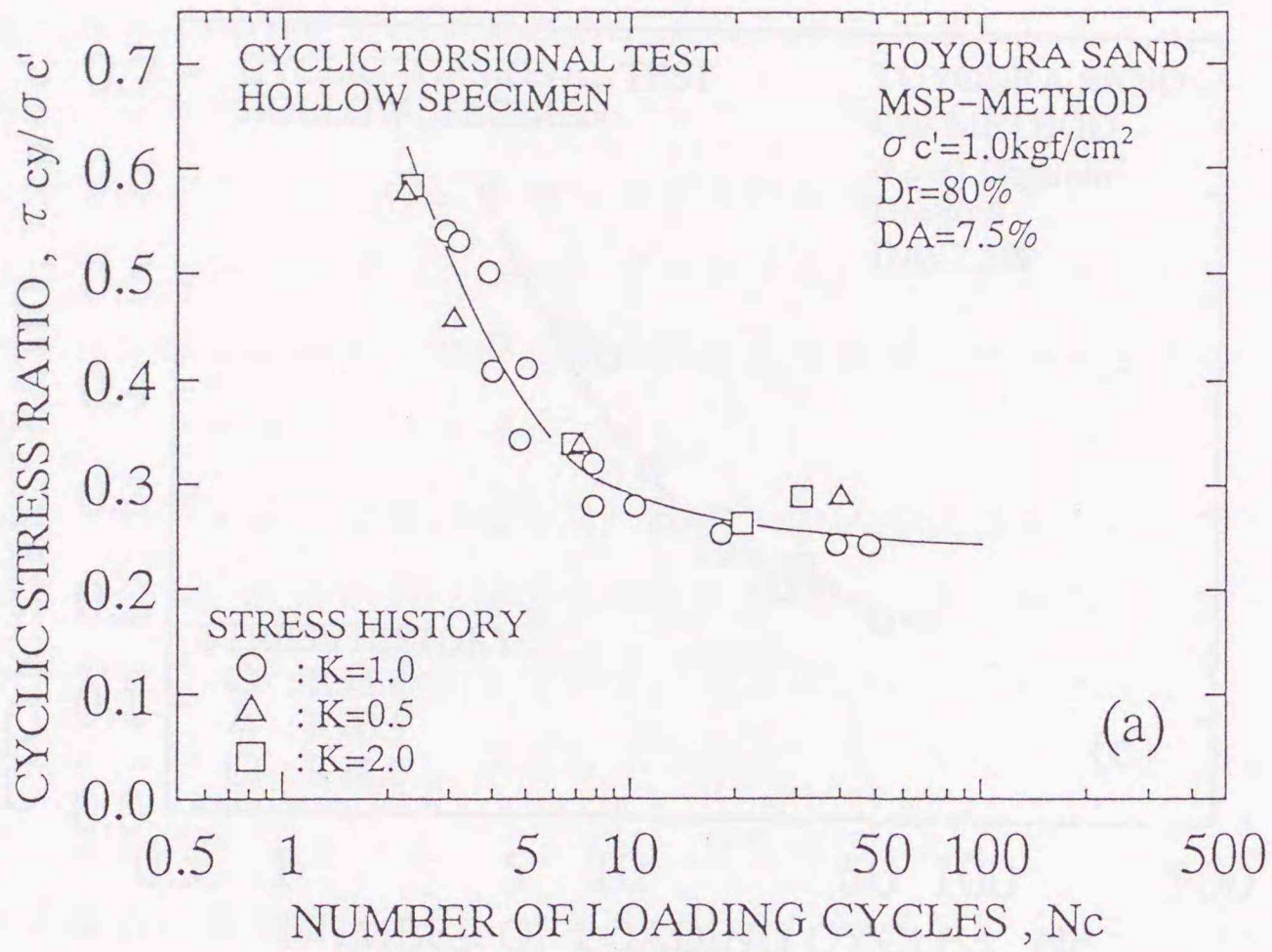
３．４．６　中空ねじり試験による比較

これまで、三軸試験による液状化強度に及ぼす異方圧密履歴の影響を示してきたが、試験方法が異なる場合その影響の仕方は変化するかを、ＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法で作製した供試体に対して中空ねじり試験を行い比較した。応力履歴の与え方はＣＫＣ－経路でＫ＝0.5，2.0の異方圧密履歴を与えた。

図３－38はそれぞれの供試体作製方法における異方圧密履歴による液状化強度の変化を示したものであるが、供試体作製法に依らず異方圧密履歴の影響はほとんど現れていない。このように、三軸試験では顕著な液状化強度の変化が認められたのに中空ねじり試験においてはその影響が認められなかったのは以下のように考えられる。

三軸試験においては、異方圧密履歴を与える方向が三軸圧縮または伸張方向の応力履歴であり繰返し載荷も同方向に加えられる。したがって、ある程度の主応力比の範囲では応力履歴を与えた方向での硬化が進行しその方向での繰返し載荷時の変形特性が異なるため、影響が現れた一因と考えられる。それに対して中空ねじり試験においては、繰返し載荷時は主応力方向が異方圧密履歴を与えた際の主応力方向と異なるため、たとえ異方圧密履歴によってその後のダイレタンシー特性が変化したとしても、三軸試験のような大きな影響は受けないと考えられる。このため、中空ねじり試験においては、今回行ったような異方圧密履歴の範囲では液状化強度に影響を及ぼさなかったと言える。

原位置における応力状態を考えると、地震時の応力状態は中空ねじり試験の方が三軸試験よりも対応しているので、異方圧密履歴の影響は大きな影響を及ぼさないと言える。言い換えれば、三軸試験から液状化強度を推定する場合には、その試験法の問題からかえって的確な評価ができない恐れがあることも示している。



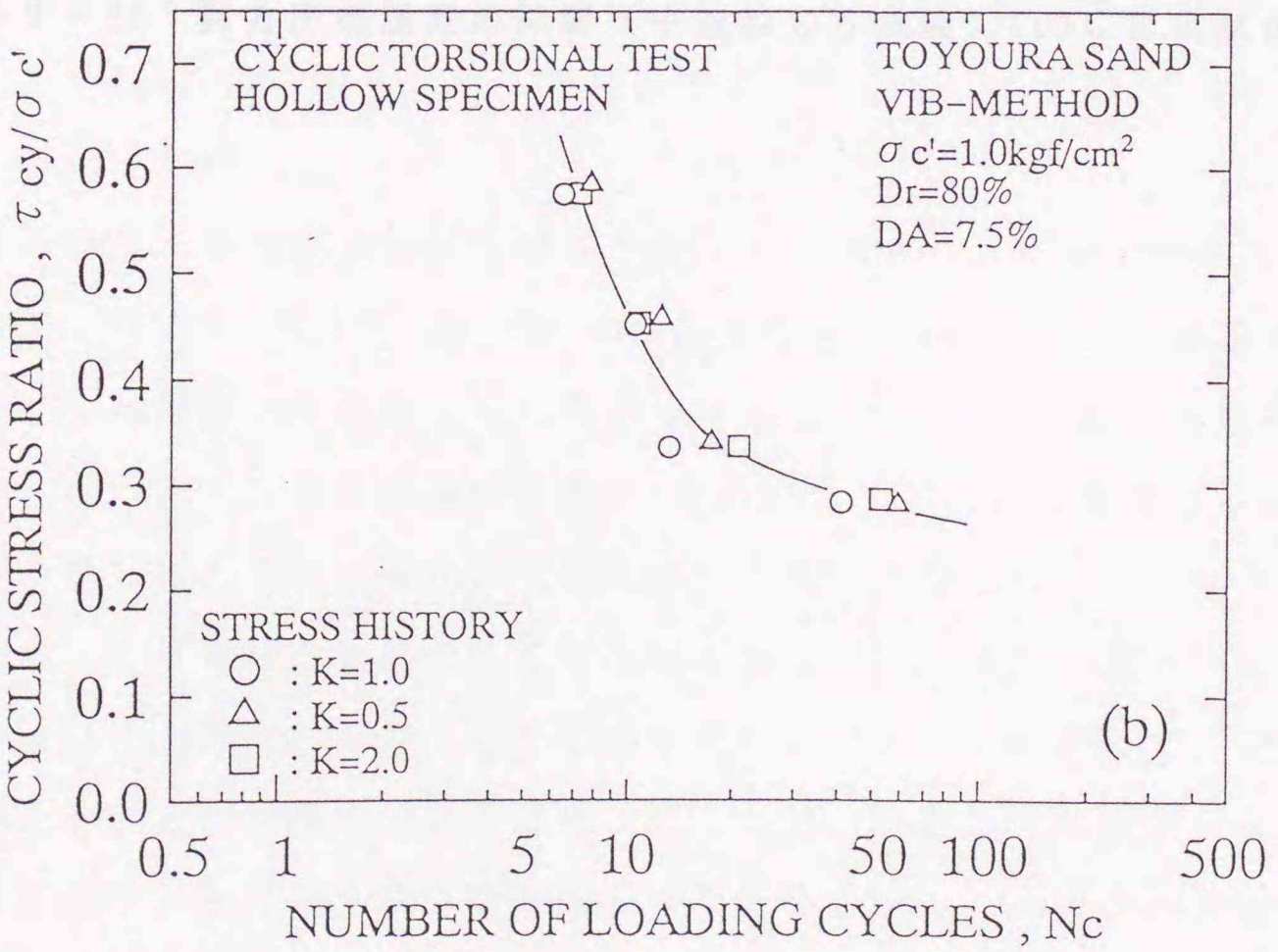


図３－38　異方圧密履歴の影響（中空ねじり試験）
(a)ＭＳＰ供試体(b)ＶＩＢ供試体

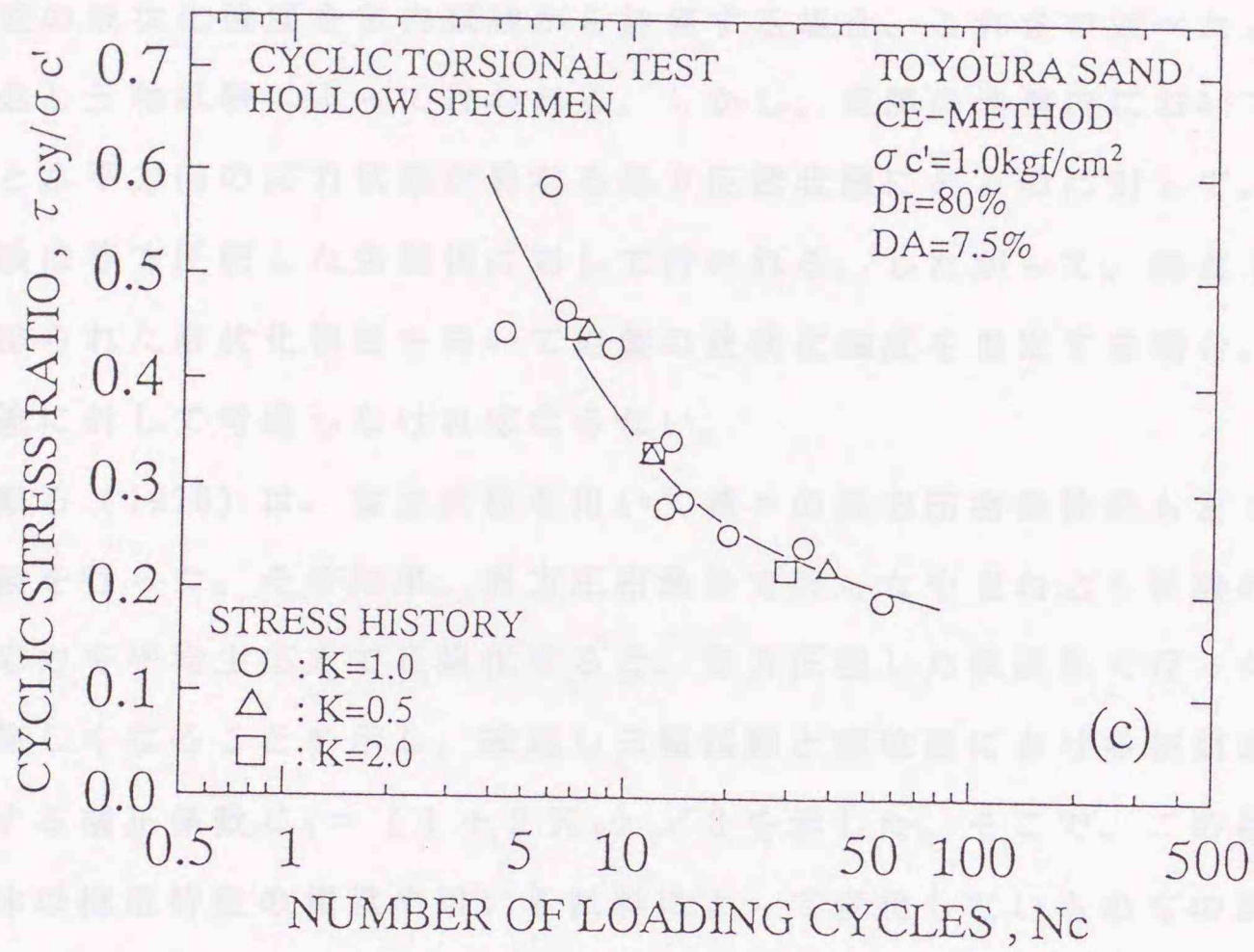


図３－38　異方圧密履歴の影響（中空ねじり試験）（c）ＣＥ供試体

３．５　初期応力状態の影響

地盤の液状化強度を室内試験から評価する場合、これまで述べたように一般に繰返し三軸試験によって行われる。しかし、実際の地盤内においては、鉛直方向と水平方向の応力状態が異なる異方圧密状態にあるのに対して、繰返し三軸試験は等方圧密した供試体に対して行われる。したがって、繰返し三軸試験から得られた液状化強度を用いて地盤の液状化強度を推定する場合、圧密条件の相違に対して考慮しなければならない。

石原ら（1976）は、富士川砂を用いて種々の異方圧密条件のもとで中空ねじり試験を行った。その結果、異方圧密条件で行った中空ねじり試験の繰返しせん断応力を平均主応力で正規化すると、等方圧密した供試体で行った液状化強度と等しくなることを示し、繰返し三軸試験と原位置における初期応力の相違に対する補正係数$C_1=(1+2K_0)/3$を示した。そこで、この補正係数が供試体の構造特性の相違や用いる試料によって変化しないものなのかを明らかにするため、３種類の方法で作製した豊浦砂供試体および２種類の方法で作製した相馬砂供試体に対して、Ｋ＝０．５，１．０，２．０の応力状態(平均主応力$p'=1.0\ kgf/cm^2$）のもとで（相馬砂はＫ＝０．５，１．０）、中空ねじり試験を行い結果を比較した。

図３－39は、豊浦砂を用いてＭＳＰ法，ＶＩＢ法，ＣＥ法で作製した供試体に対して、Ｋ＝０．５，１．０，２．０の圧密状態で試験を行った結果を、平均主応力$\sigma m'$で正規化した繰返しせん断応力比$\tau cy/\sigma m'$と両振幅せん断ひずみＤＡ＝７．５％に達するまでの載荷回数Ｎｃとの関係で示したものである。図より、豊浦砂の場合はどの供試体作製方法においても、平均主応力で正規化した液状化強度に、圧密条件の相違による差は認められない。また、図３－40に示す相馬砂においても液状化強度に差は認められていない。したがって、試験時と地盤内の圧密状態の相違に対する補正に関しては、等方圧密した供試体の液状化強度に石原らが示した補正係数を乗じることによって、供試体の作製方法および試料によらず、異方圧密状態での液状化強度が得られることが示された。

ただし、上記の結果は中空ねじり試験における結果であるので、等方圧密状態での三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度が等しい場合のみ、三軸試

験と原位置での圧密条件の相違に対する補正が可能である。そこで、次節では供試体の作製方法や試料の相違によって、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の関係がどのように異なるかを比較する。

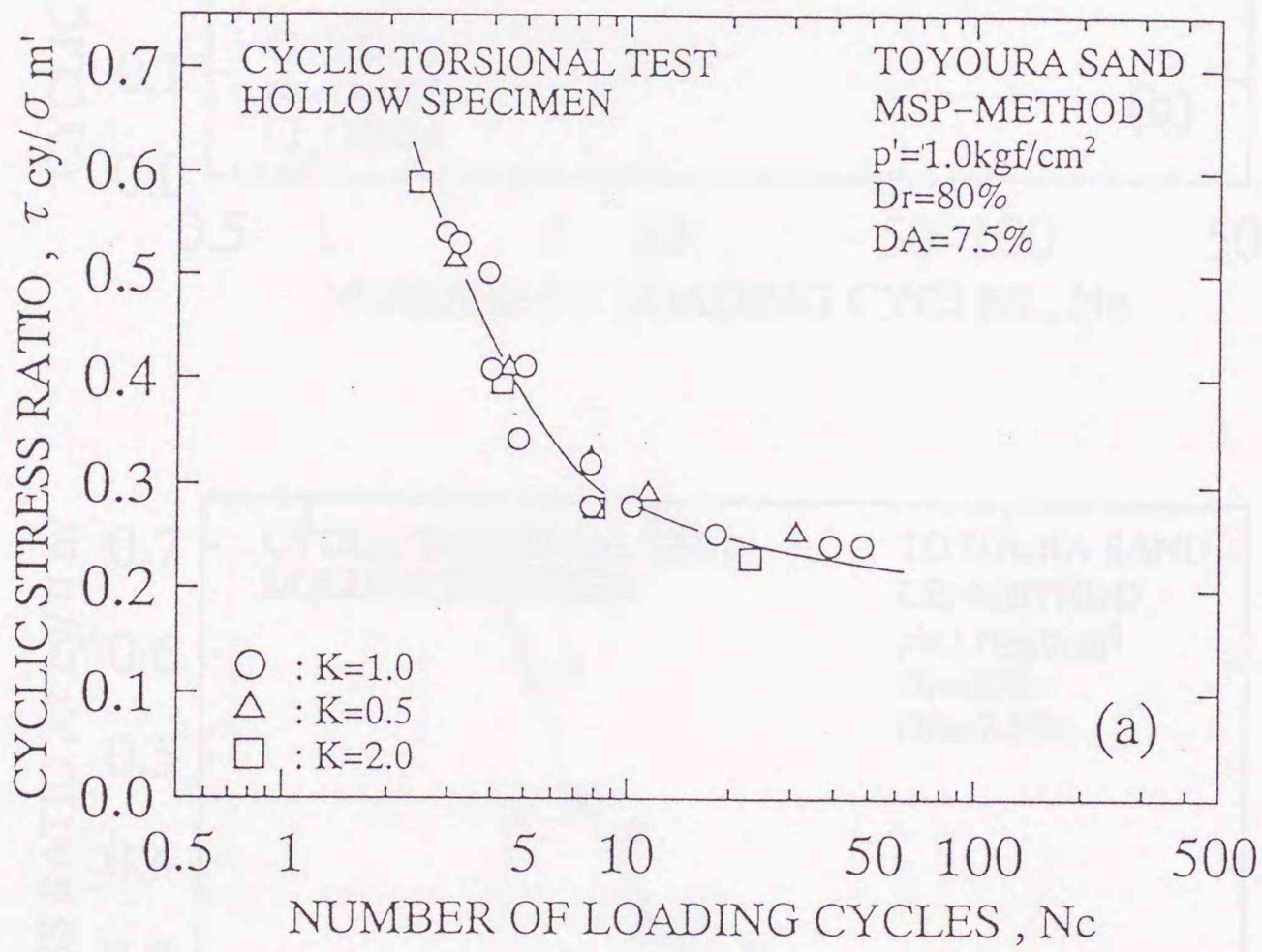
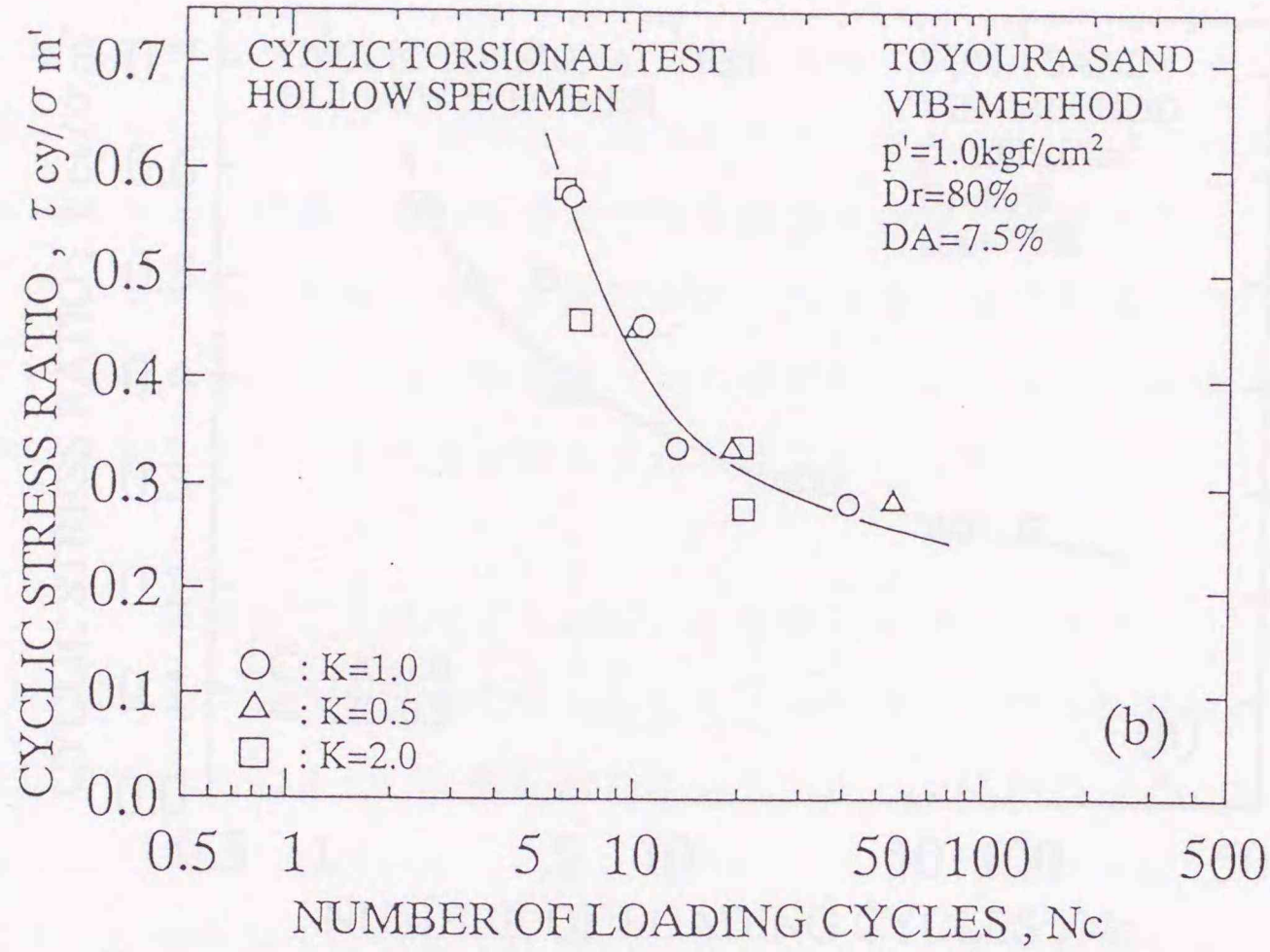


図３－39　液状化強度に及ぼす初期応力の影響（豊浦砂）
(a)ＭＳＰ供試体



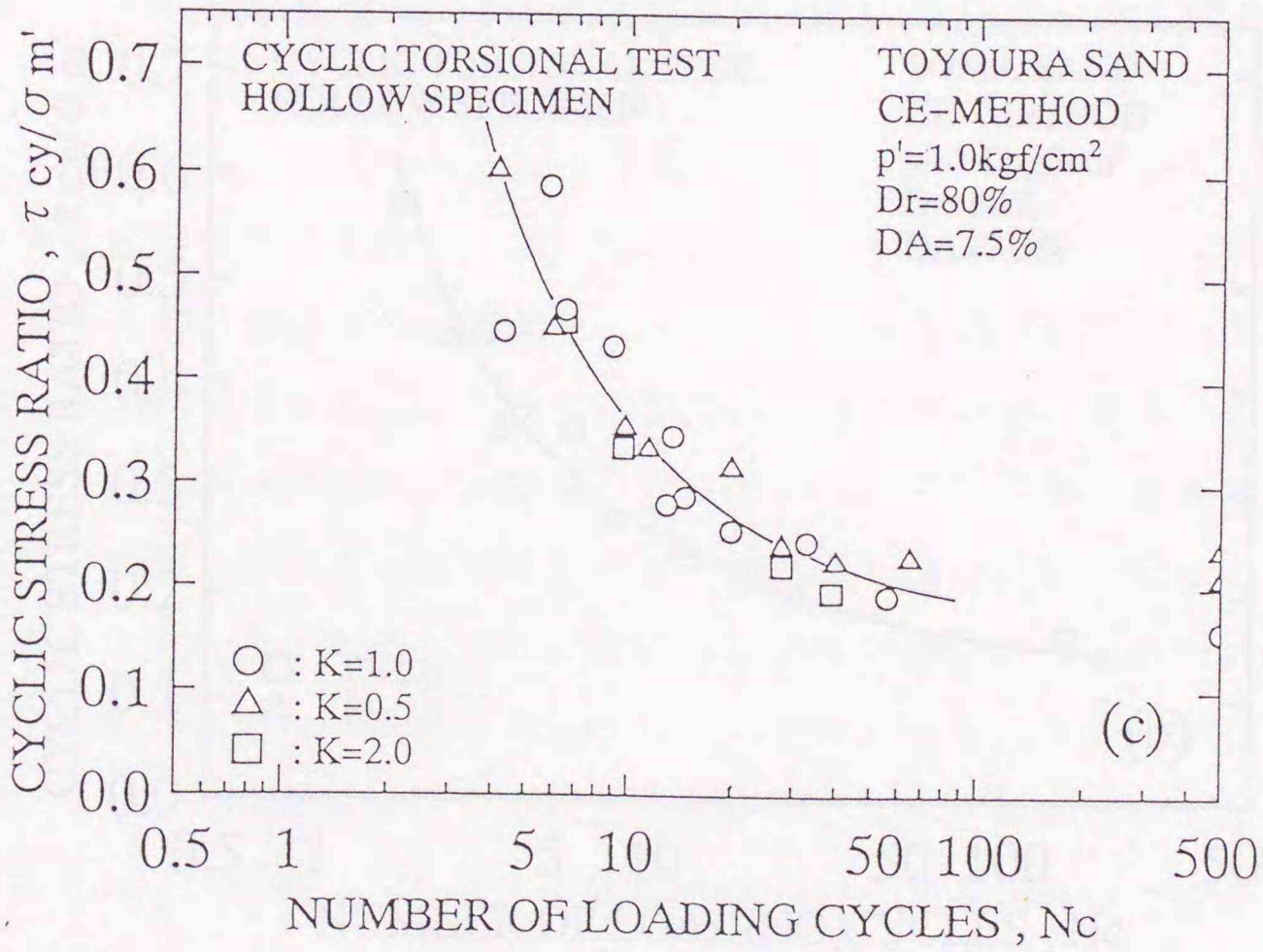
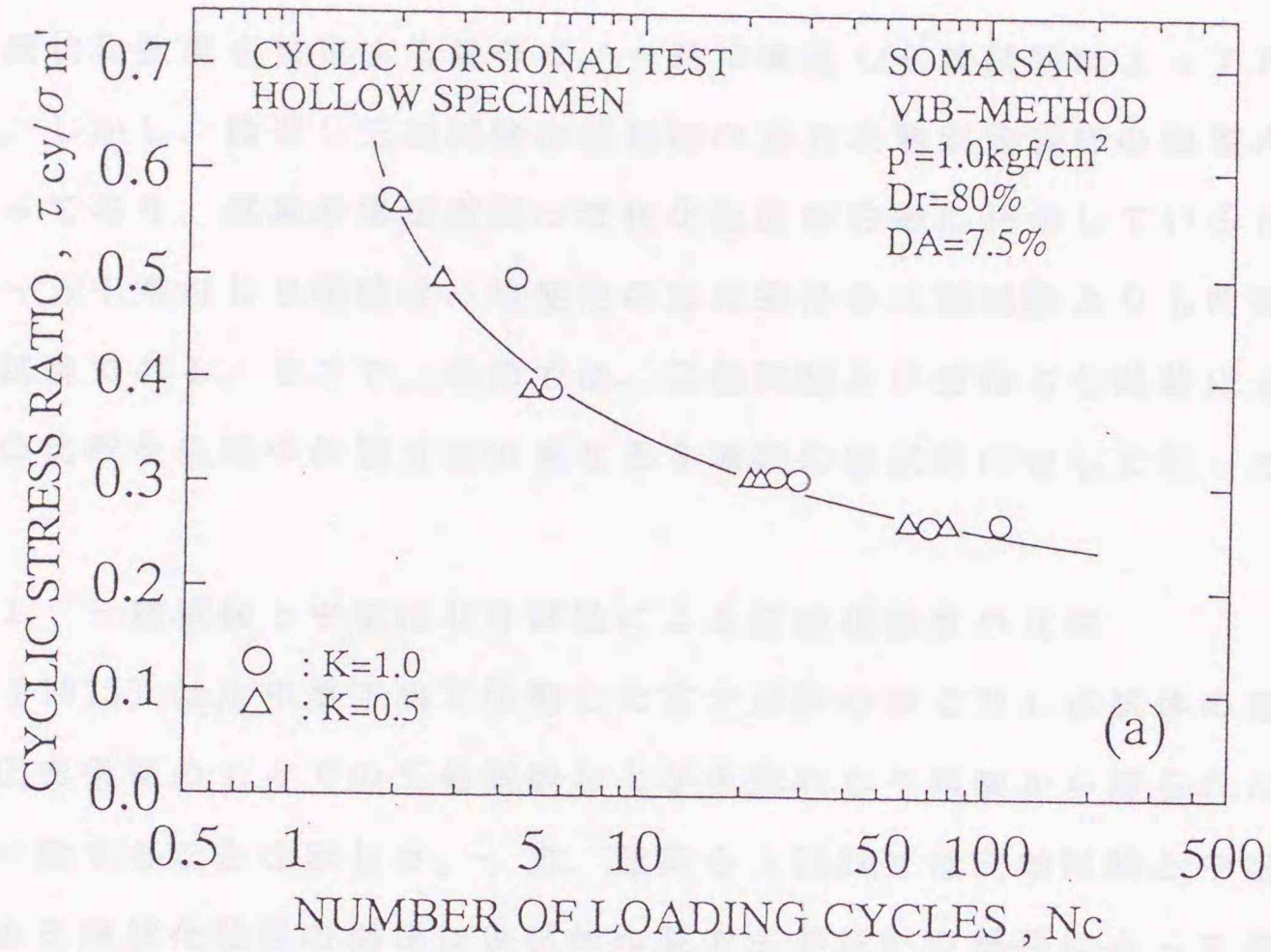


図３－39　液状化強度に及ぼす初期応力の影響（豊浦砂）
(b)ＶＩＢ供試体(c)ＣＥ供試体



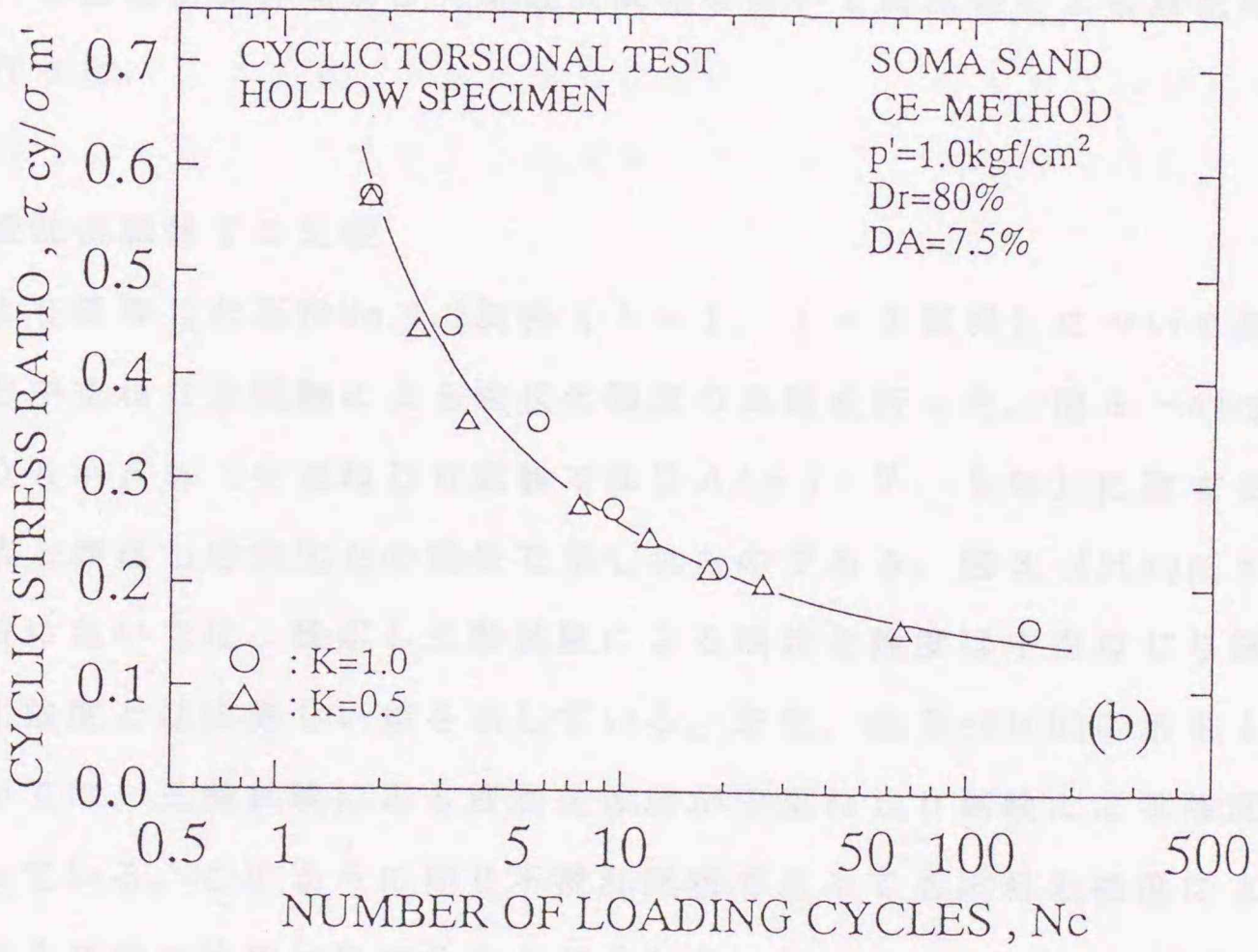


図 3 － 40　液状化強度に及ぼす初期応力の影響（相馬砂）
(a)ＶＩＢ供試体(b)ＣＥ供試体

3．6　三軸試験とねじり試験の比較

地盤の液状化強度を判定する場合に、一般に繰返し三軸試験によって評価されている。しかし、繰返し三軸試験は試験時の応力状態が地震時の地盤内のそれと異なっており、試験結果が実際の液状化強度を的確に評価しているとは言えない。一方中空ねじり試験は、地盤内の応力条件を三軸試験よりも的確に再現できる試験である。そこで、本節では、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較を供試体作製方法の異なる3種類の砂試料に対して行った。

3．6．1　三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較

石原ら（1975）は水中落下法で作製した富士川砂のゆる詰め供試体の場合には、等方圧密条件のもとでの三軸試験および中空ねじり試験から得られた液状化強度は一致することを示した。一方、龍岡ら（1986）は三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の関係は供試体作製方法や試料の種類によって多様に変化することを示した。

そこで、不攪乱供試体および再構成供試体を用いて両試験による液状化強度の比較を行った。

1）　不攪乱供試体での比較

原位置より採取した石狩No.1,2試料（Ⅰ－1，Ⅰ－2試料）について繰返し三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較を行った。図3－41は両試験結果をＤＡ＝5％（中空ねじり試験ではＤＡ(γ)＝7．5％）に達するまでの載荷回数と繰返し応力比との関係で示したものである。図3-41(a)に示したⅠ－1試料においては、繰返し三軸試験による液状化強度は中空ねじり試験による液状化強度とほぼ等しい値を示している。また、図3-41(b)に示すⅠ－2試料においては、三軸試験による液状化強度が中空ねじり試験による強度よりも高くなっている。このように同じ不攪乱試料であっても試料の相違によって両試験による液状化強度は異なることが分かる。

すなわち、供試体の構造が異なると両試験による液状化強度の相互関係は異なると考えられる。そこでⅠ－1，Ⅰ－2試料の構造特性を知るために繰返し

三軸試験での軸ひずみの発生状況の典型的例を示したのが図３－42である。図から、繰返し載荷の圧縮時と伸張時での軸ひずみの発生状況を比較すると、Ｉ－１試料においては伸張時のひずみの発生が卓越している。それに対して、Ｉ－２試料ではＩ－１試料に比べ圧縮時におけるひずみの発生量が大きくなっている。このように、三軸圧縮条件下で変形が大きな供試体であるほど、三軸試験による液状化強度は中空ねじり試験による強度よりも高くなると考えられる。そこで、以下では供試体の構造特性の相違による両試験による液状化強度の関係を調べるために３種類の方法で作製した再構成供試体を用いて比較した。

２）　再構成供試体での比較

３．２節で述べたように、液状化強度は供試体の作製方法によって大きく異なることが示された。また、供試体作製方法の影響は三軸試験と中空ねじり試験によって異なることも示された。したがって、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の関係も供試体作製方法によって異なることが考えられる。そこで、ＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法で作製した供試体を用いて数種類の試料に対して両試験による液状化強度を比較した。ここで、中空ねじり試験は中空の供試体に対する試験であるため、三軸試験と比較する際、供試体形状の相違による液状化強度の変化を避けるため、三軸試験においても中空ねじり試験と同じ中空供試体を用いた。

図３－43は、ＭＳＰ法で作製した相対密度Ｄｒ＝７０，８０，９０％の豊浦砂供試体について、繰返し三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度を比較したものである。ＭＳＰ法で作製した供試体の場合は、相対密度によらず繰返し三軸試験よりも中空ねじり試験による液状化強度の方がはるかに高くなっている。

図３－44は、ＶＩＢ法で作製した豊浦砂、当別砂、相馬砂供試体に対する結果を示したものである。豊浦砂の場合はＭＳＰ法と同様、中空ねじり試験による液状化強度の方が高くなっているがその差はＭＳＰ供試体の場合よりも小さい。一方当別砂の場合は、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度は相対密度が異なっても、ほとんど同じ強度を示している。相馬砂においては、やや中空ねじり試験による液状化強度が高くなっている。このように、ＶＩＢ法で

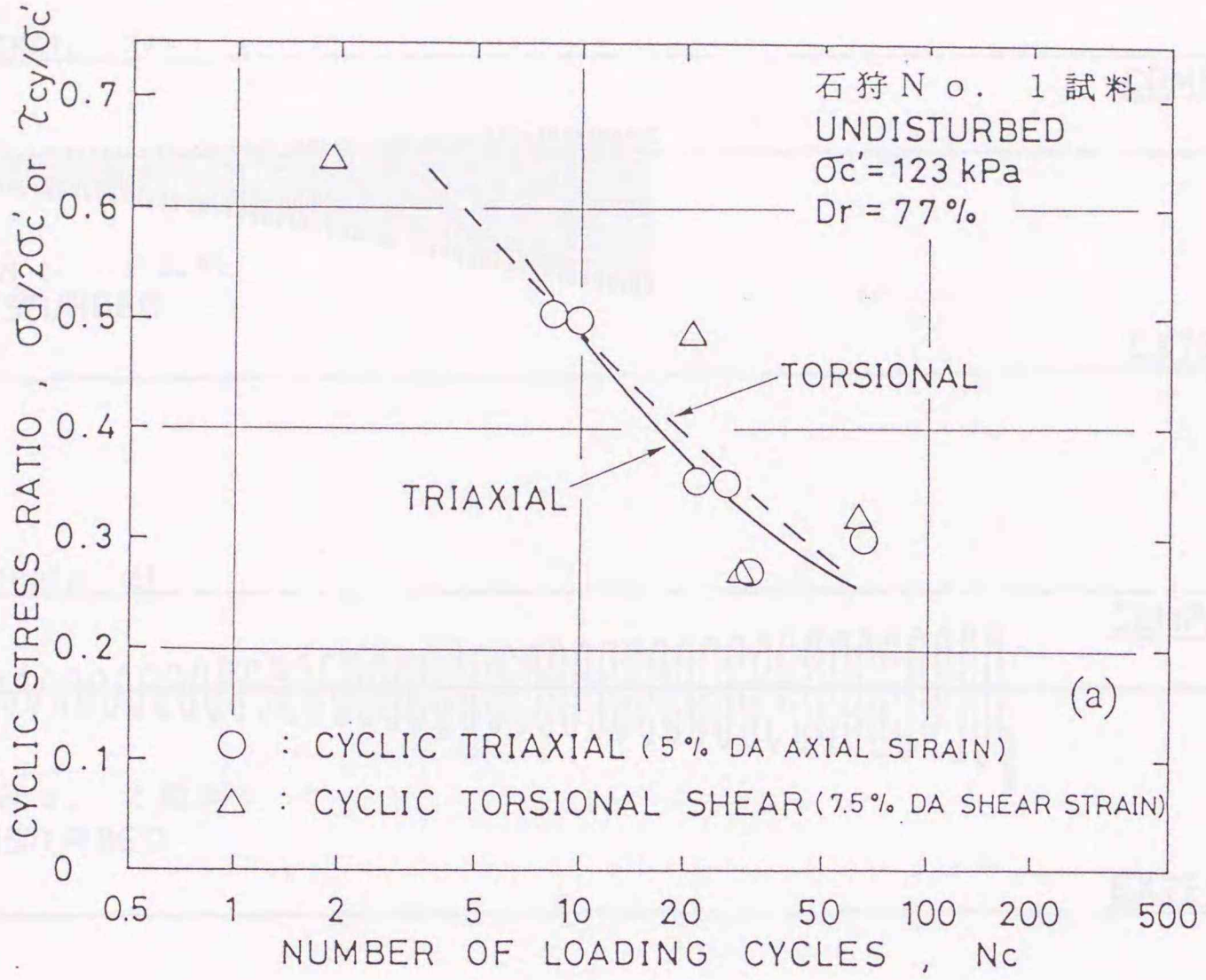
作製した供試体においては、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度はほぼ等しいこととことが分かる。しかし、試料によって両試験による液状化強度の関係がやや異なった。

最後にＣＥ法で作製した供試体の比較を行う。図３－45は、ＶＩＢ法と同様に豊浦砂、当別砂、相馬砂供試体に対して示したものである。ＣＥ法の場合は、どの試料においても三軸試験による液状化強度が中空ねじり試験によるそれよりもやや高くなっている。

このように、供試体作製方法の相違によって両試験による液状化強度の関係が異なるのは、不攪乱試料に対して指摘したように供試体の構造特性によるとものと考えられる。図３－42と同様に繰返し三軸試験における軸ひずみの発生状況と有効応力経路を豊浦供試体に対して図３－46，47（再掲）に示す。図より、ＭＳＰ供試体の三軸試験における変形特性は伸張側に卓越しているのに対して、ＣＥ供試体はやや圧縮側に卓越している。また、ＶＩＢ供試体はその中間的な挙動を示している。また、繰返し載荷時の有効応力経路に着目すると、繰返し載荷の第１サイクルにおける間隙水圧は、ＭＳＰ供試体では圧縮時よりも伸張時の間隙水圧の発生量が卓越し、ＣＥ供試体では逆に圧縮時の間隙水圧がやや卓越している。また、ＶＩＢ供試体は間隙水圧の発生においても中間的な値となっている。これらの変形特性および間隙水圧発生特性と両試験による液状化強度の関係を比較すると、不攪乱砂と同様に、伸張側での変形量もしくは間隙水圧の発生量が大きな供試体ほど、繰返し三軸試験による液状化強度は中空ねじり試験による液状化強度よりも低くなっていることが分かる。

このように、両試験による液状化強度の関係は、龍岡らが示したように供試体作製方法および試料の相違によって複雑に変化することが分かる。全体的にみると、ＭＳＰ法で作製した供試体では繰返し三軸試験による液状化強度は中空ねじり試験による液状化強度よりも低く、ＣＥ法で作製した供試体では繰返し三軸試験による液状化強度の方が高くなっている。ＶＩＢ法で作製した供試体では、繰返し三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度に差はあまり認められない。また、同じ供試体作製方法を用いても試料の相違によって両試験の関係はやや異なることが分かった。また、龍岡らは同じ供試体作製方法を用いても相対密度が異なると両試験による液状化強度の関係も異なることも示した

が、本研究で採用した供試体作製方法では同じ試料で同じ供試体作製方法では、供試体の密度によらず両試験による液状化強度の関係は変化しないと言える。



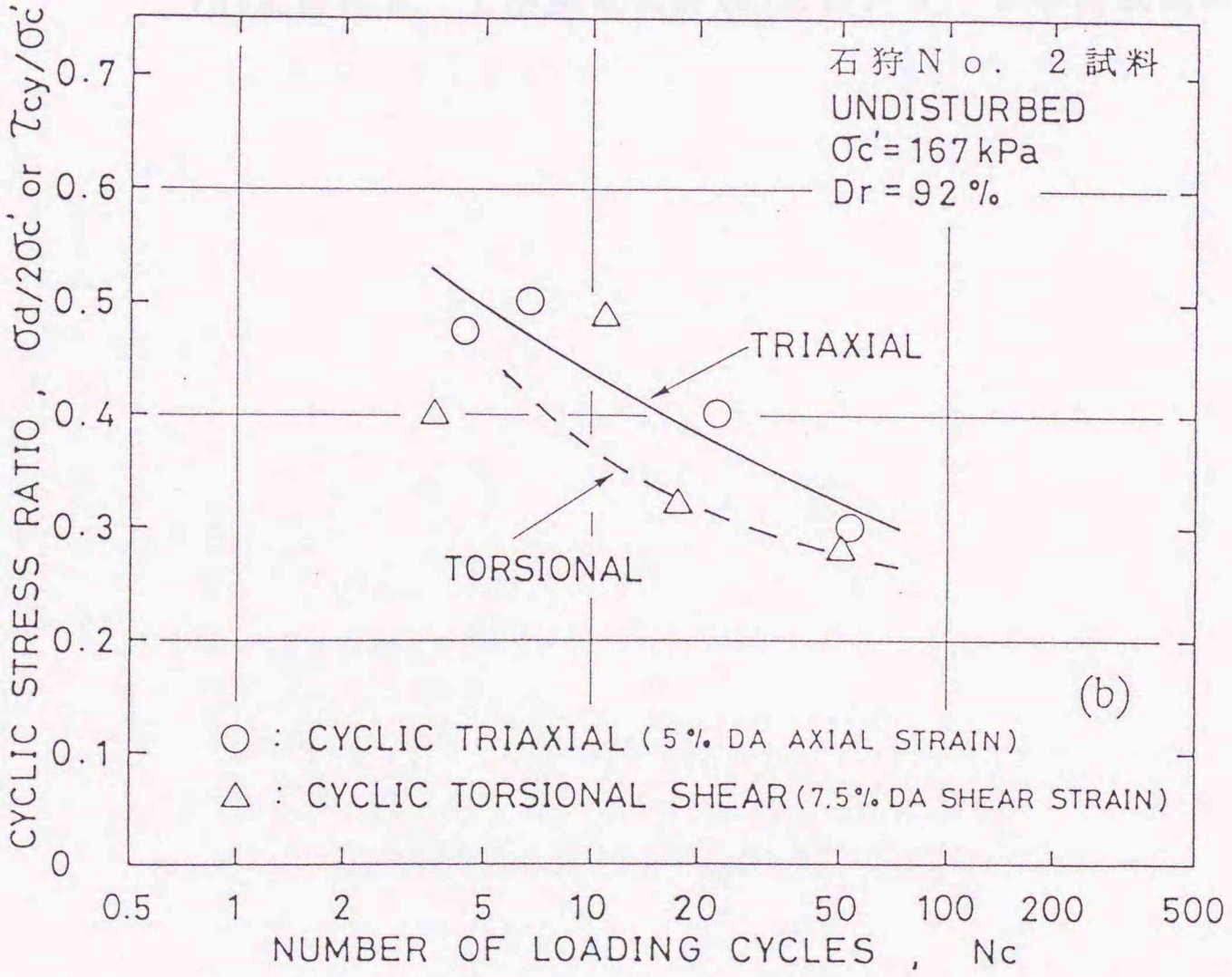


図３－41　三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較
(a)石狩Ｎｏ．１不撹乱試料(b)石狩Ｎｏ．２不撹乱試料

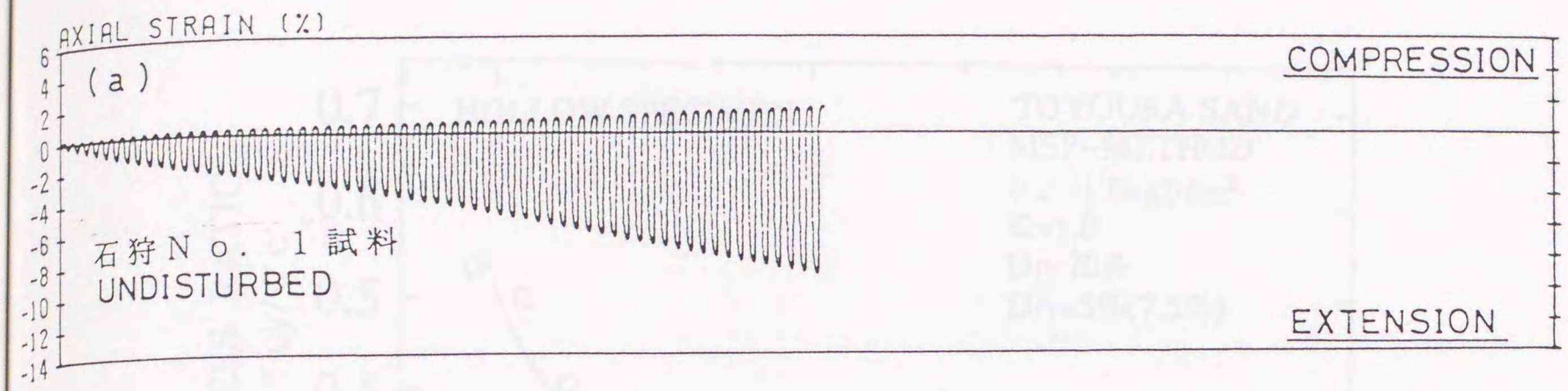
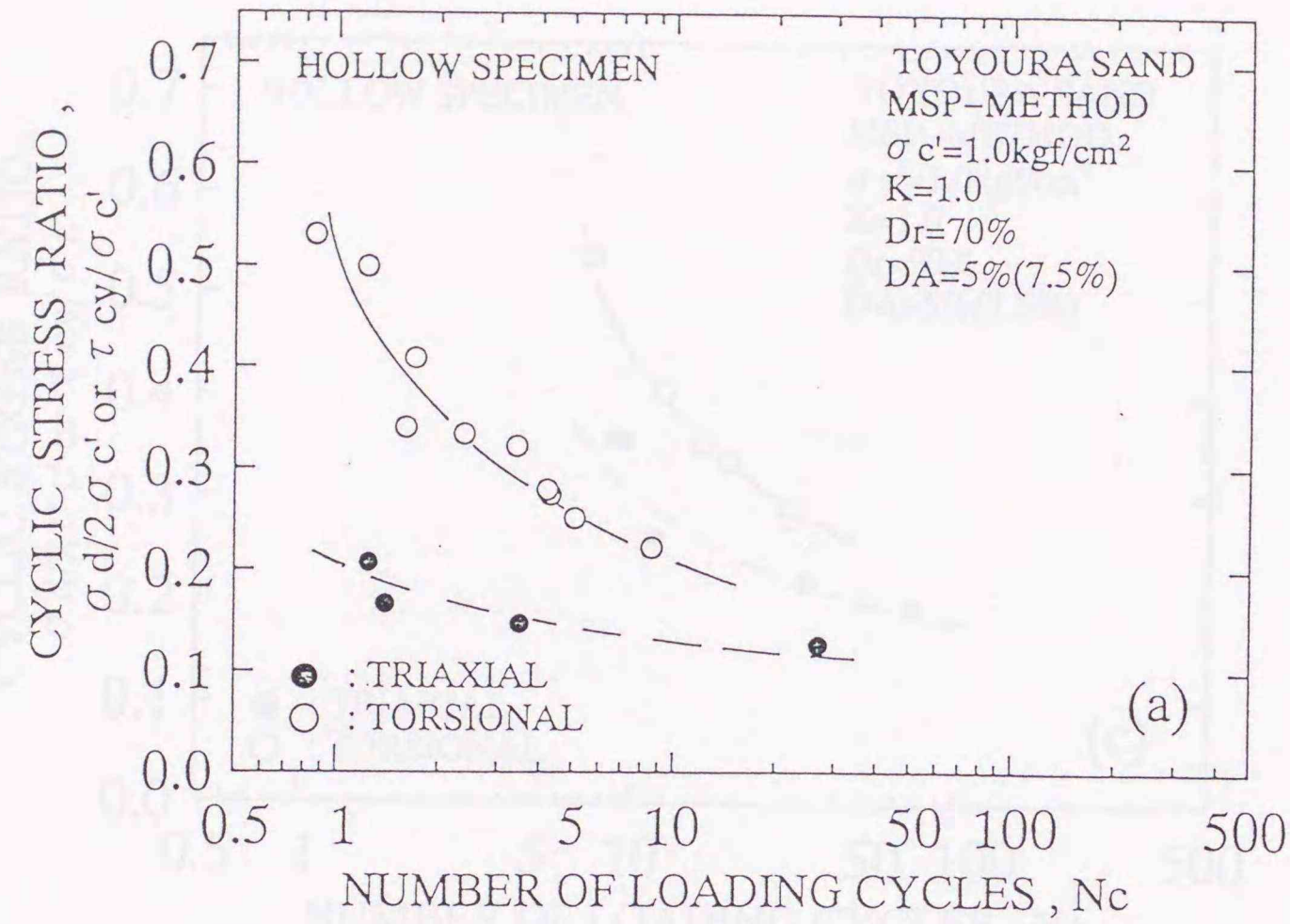


図３－42　繰返し三軸試験における軸ひずみの発生状況
(a)石狩Ｎｏ．１不撹乱試料(b)石狩Ｎｏ．２不撹乱試料



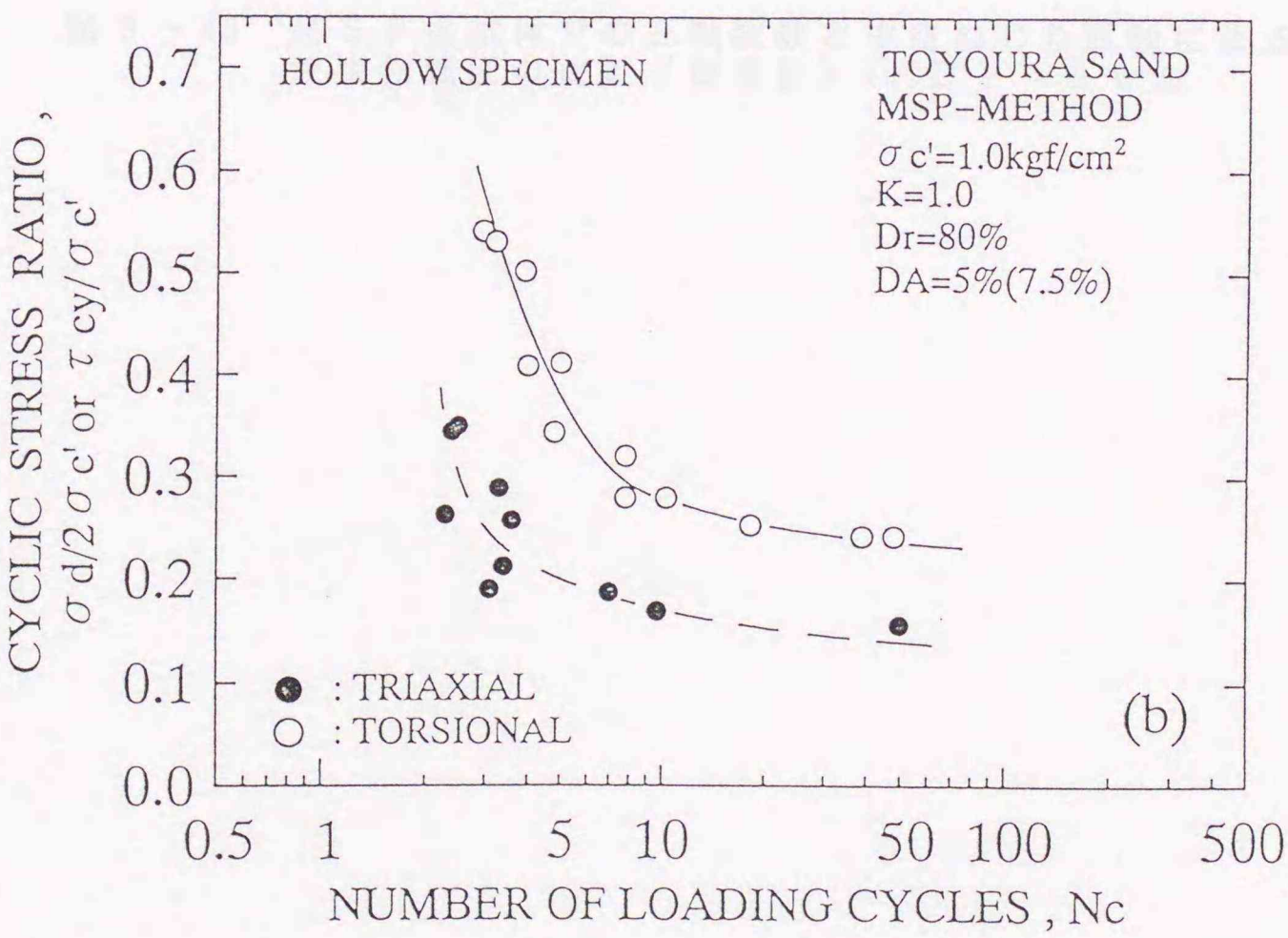


図３－43　ＭＳＰ供試体での三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較（豊浦砂）
(a)Ｄｒ＝７０％(b)Ｄｒ＝８０％

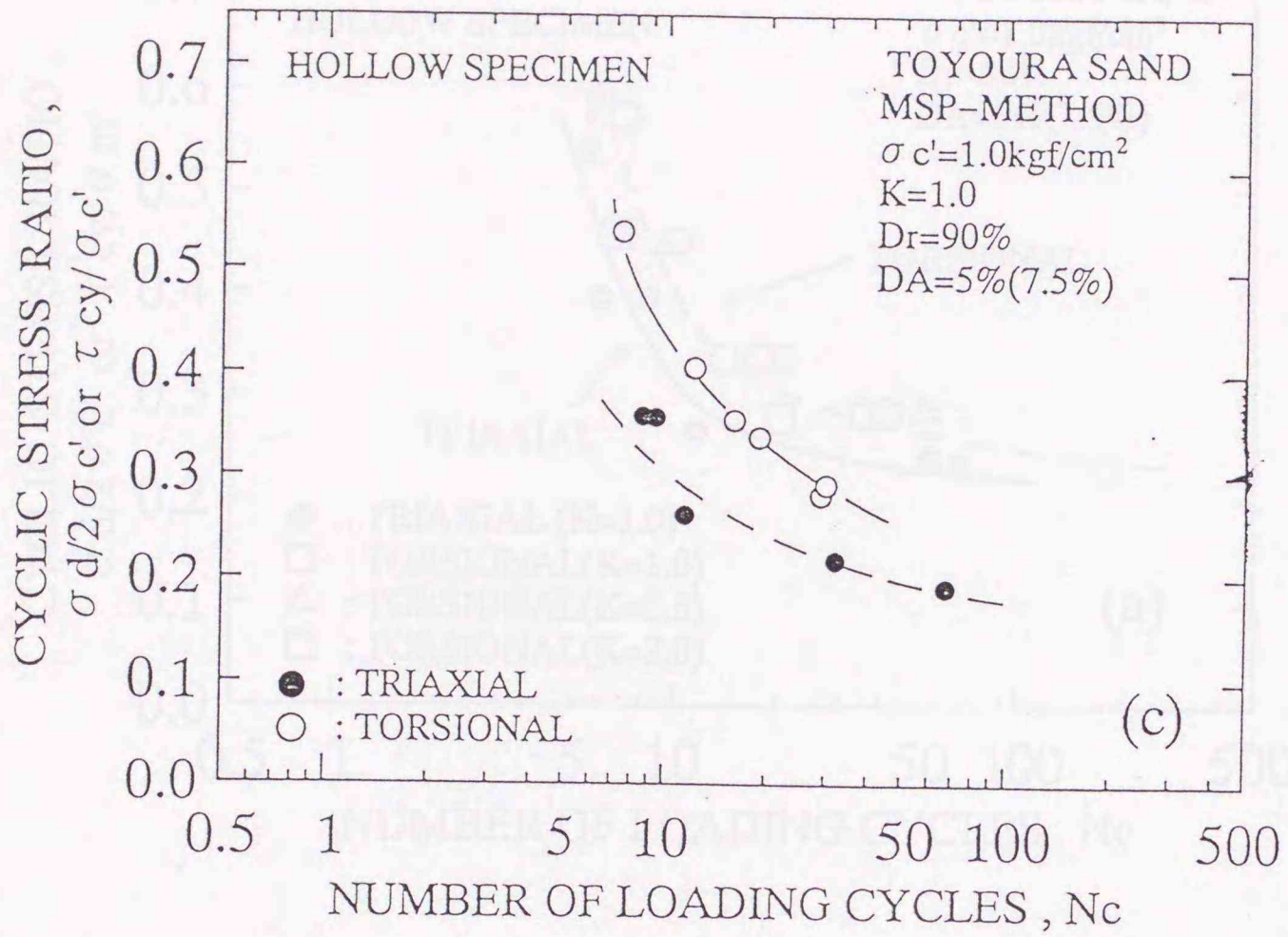
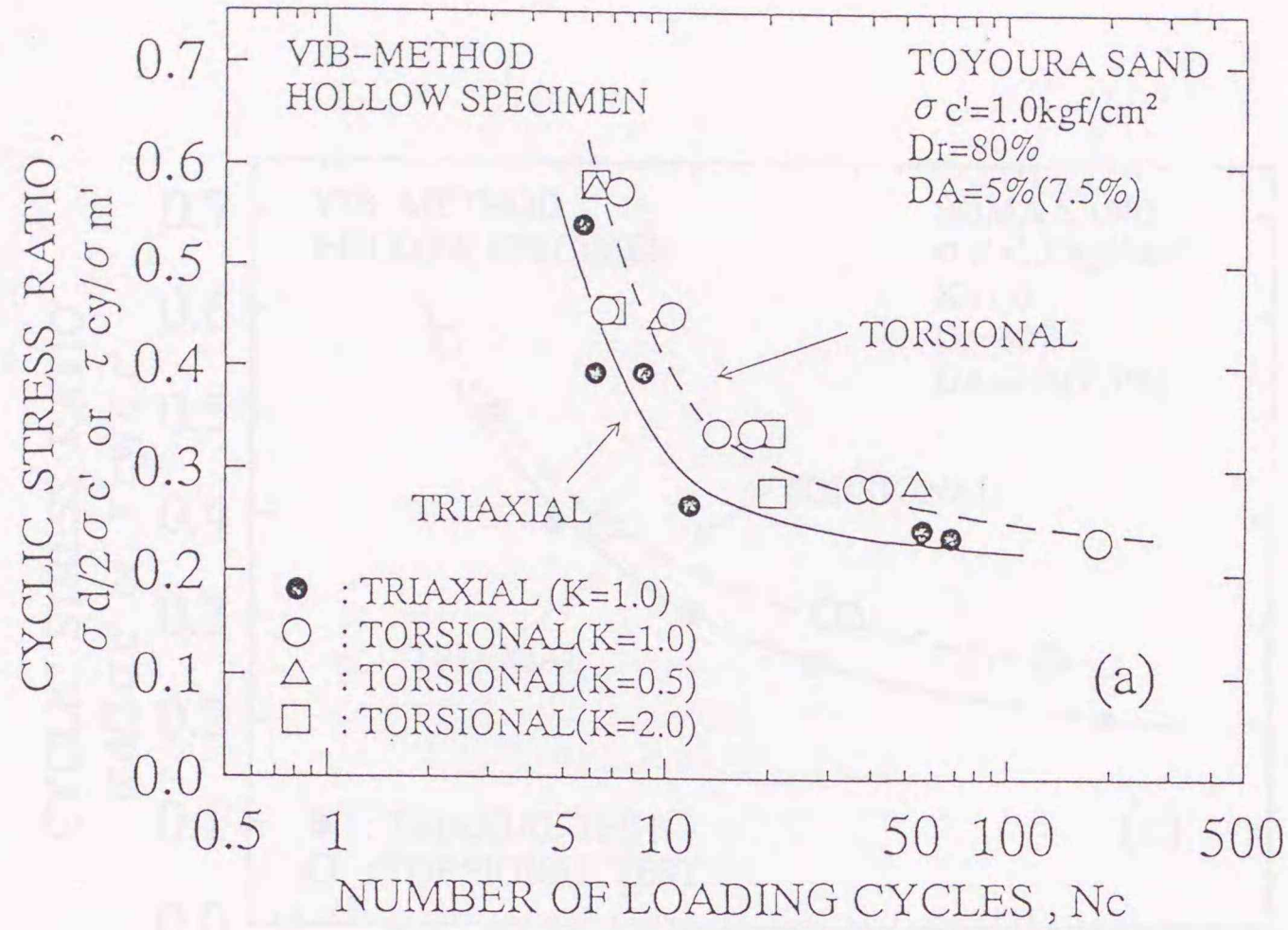


図３－43　ＭＳＰ供試体での三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較（豊浦砂）（c）Ｄｒ＝９０％



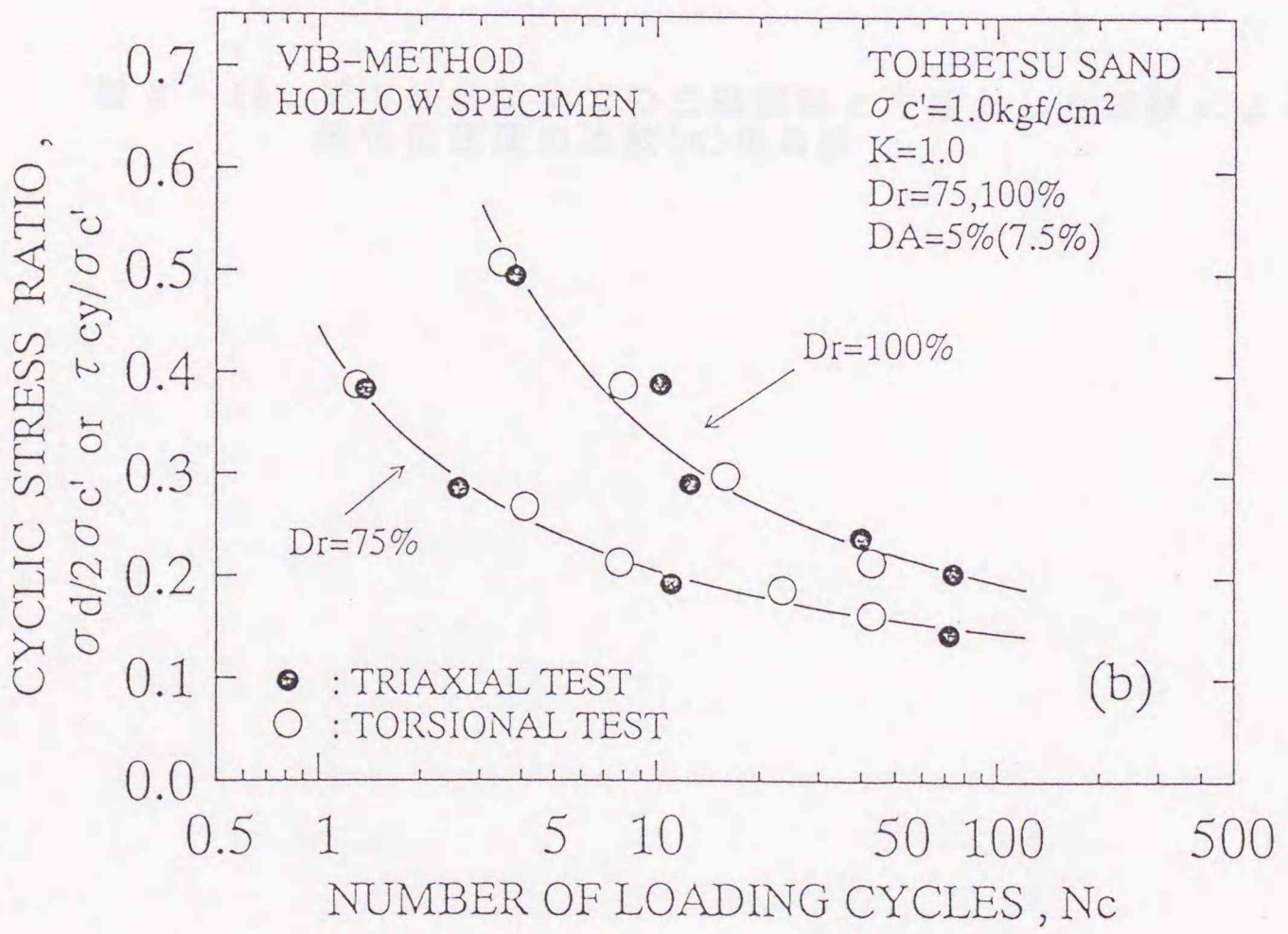


図３－44　ＶＩＢ供試体での三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較(a)豊浦砂(b)当別砂

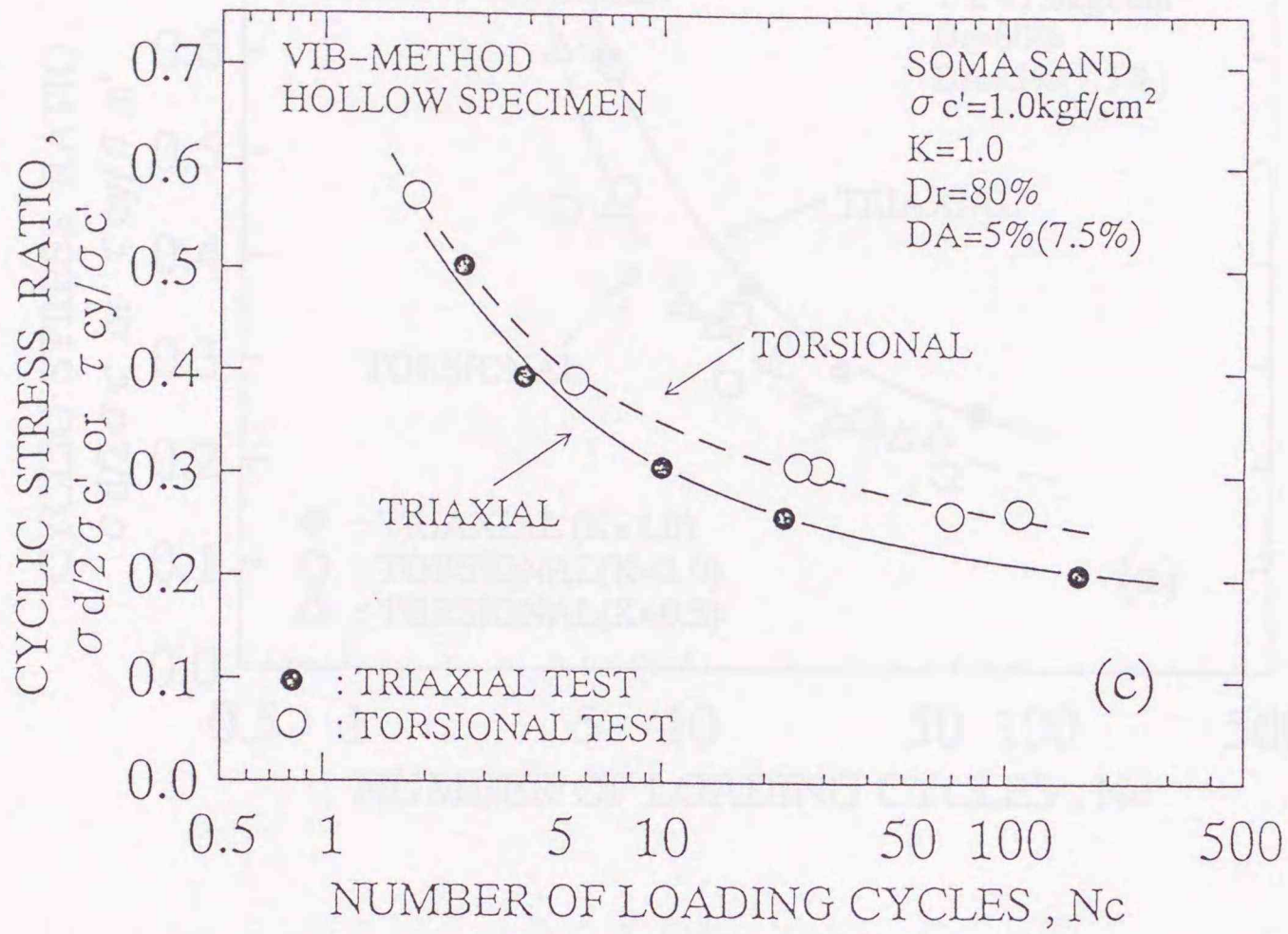
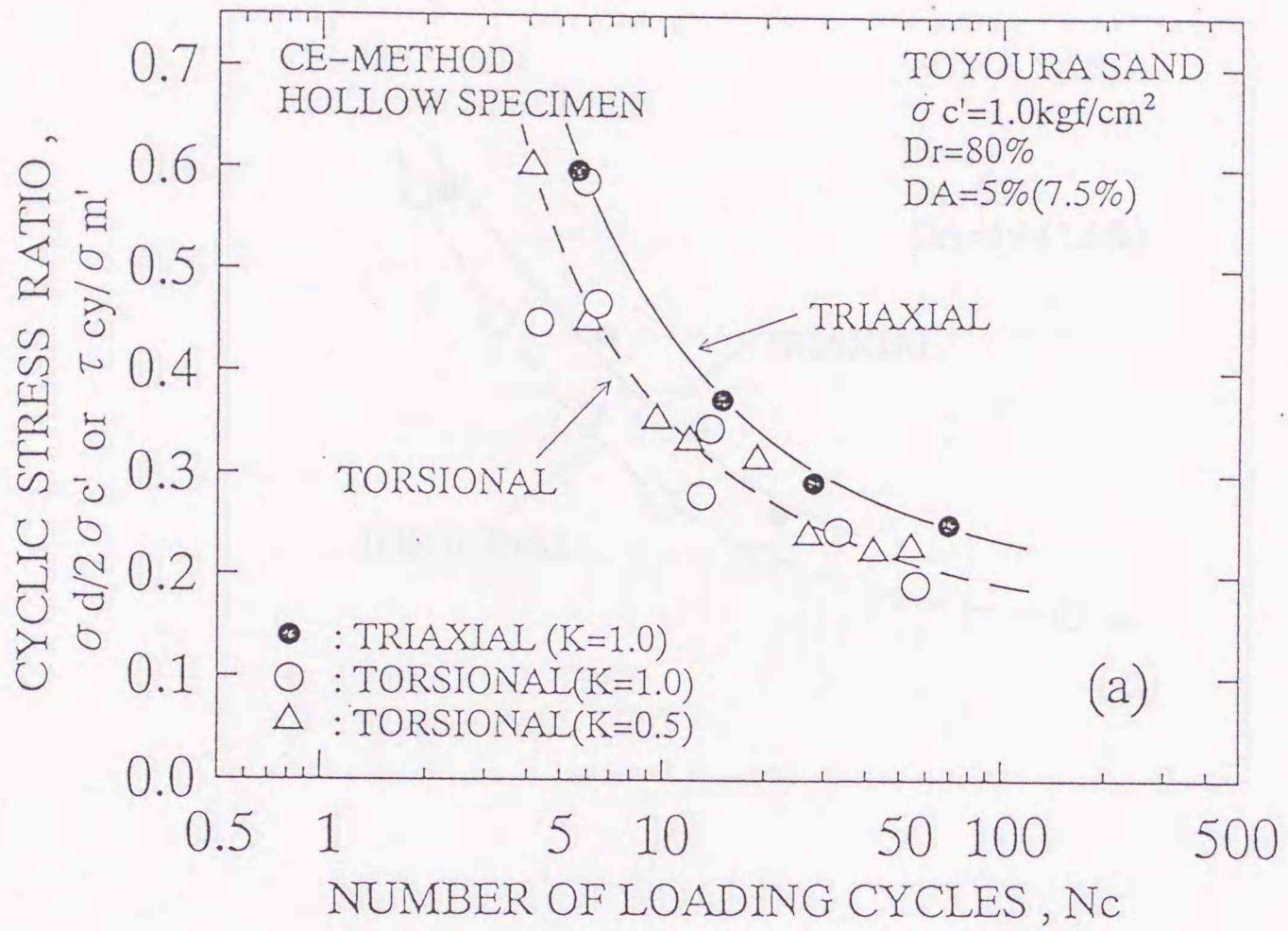


図３－44　ＶＩＢ供試体での三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較(c)相馬砂



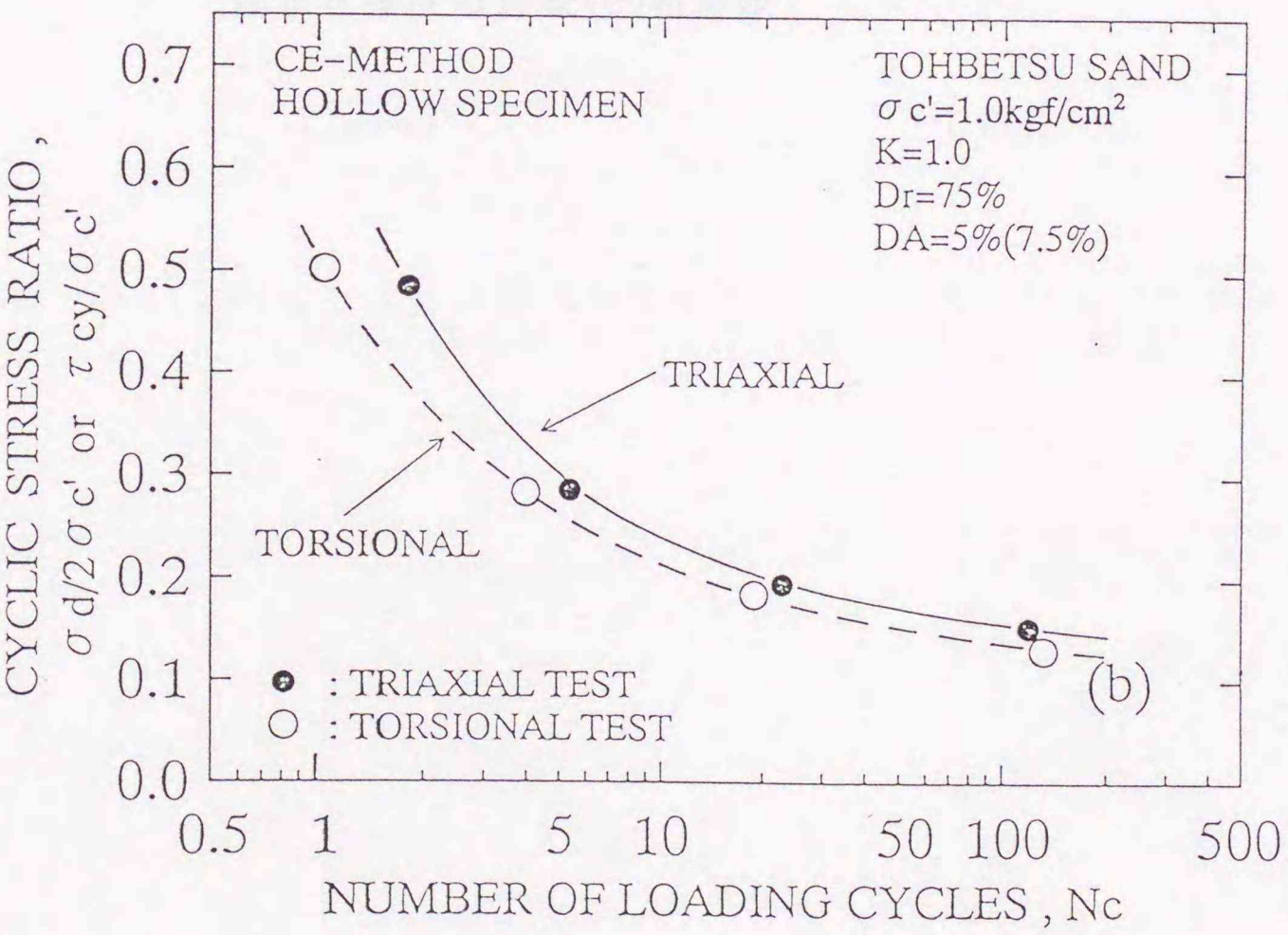


図３－45　ＣＥ供試体での三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較(a)豊浦砂(b)当別砂

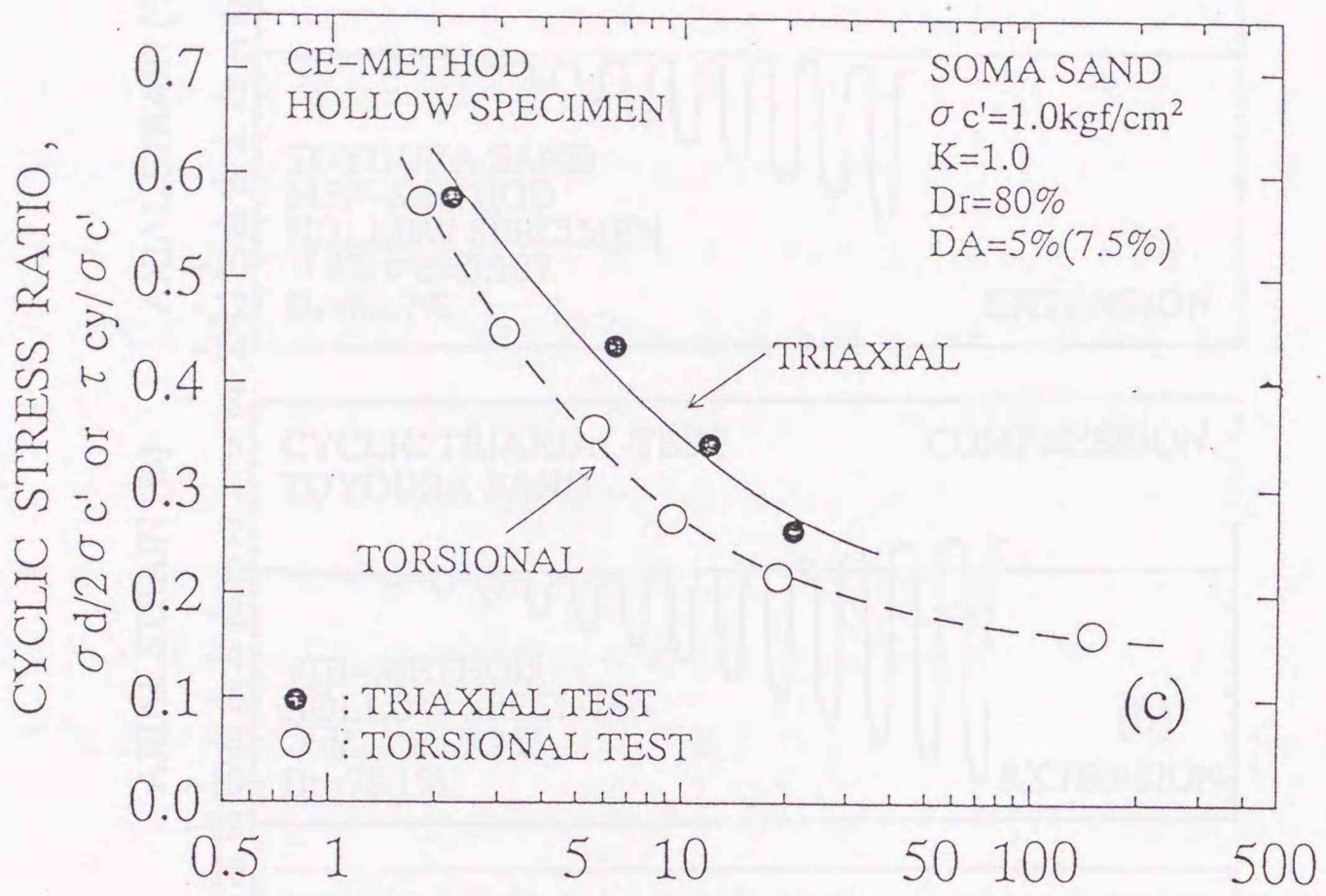


図３－45　ＣＥ供試体での三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較(c)相馬砂

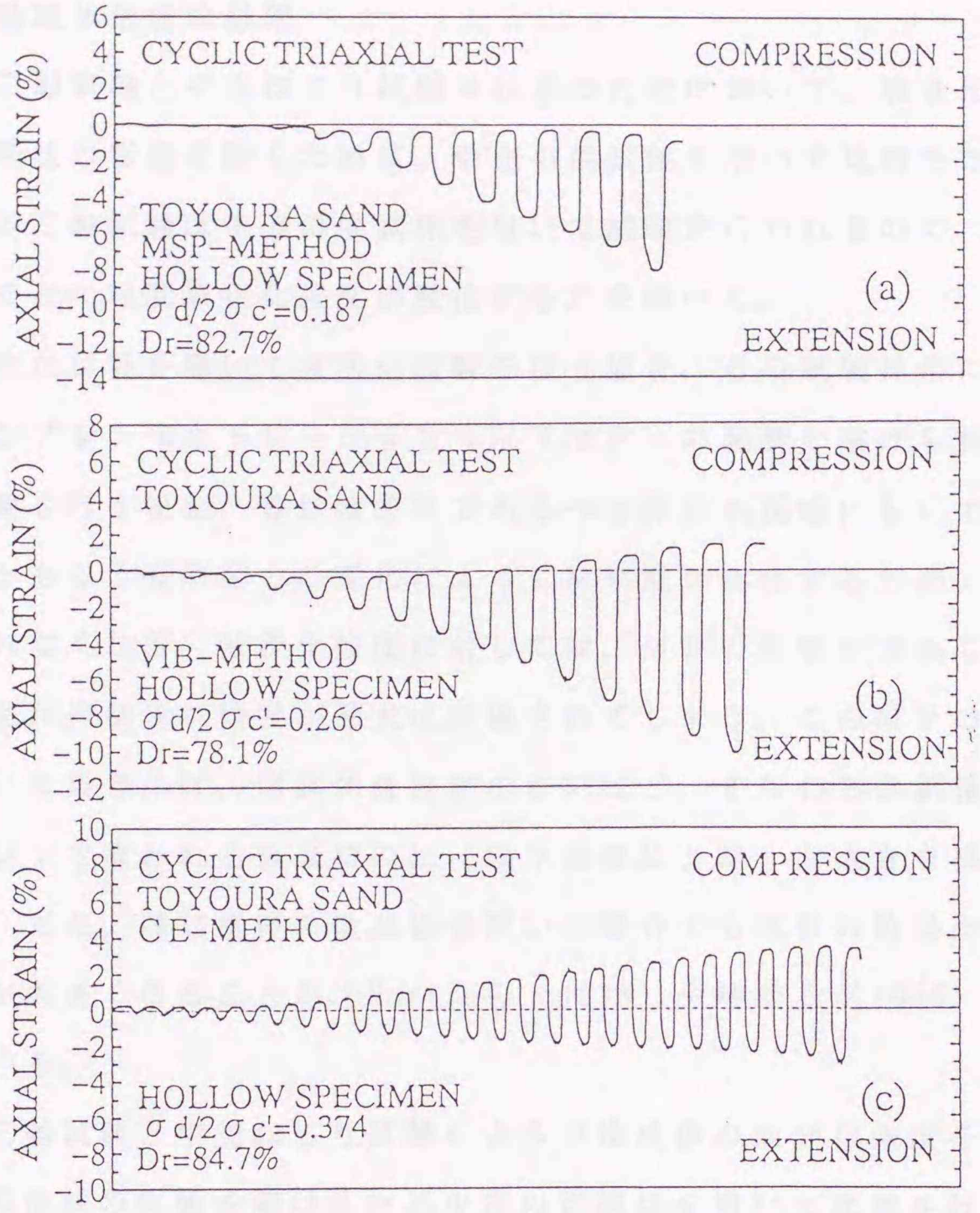


図３－46　繰返し三軸試験における軸ひずみの発生状況（豊浦砂）
(a)ＭＳＰ供試体(b)ＶＩＢ供試体(c)ＣＥ供試体

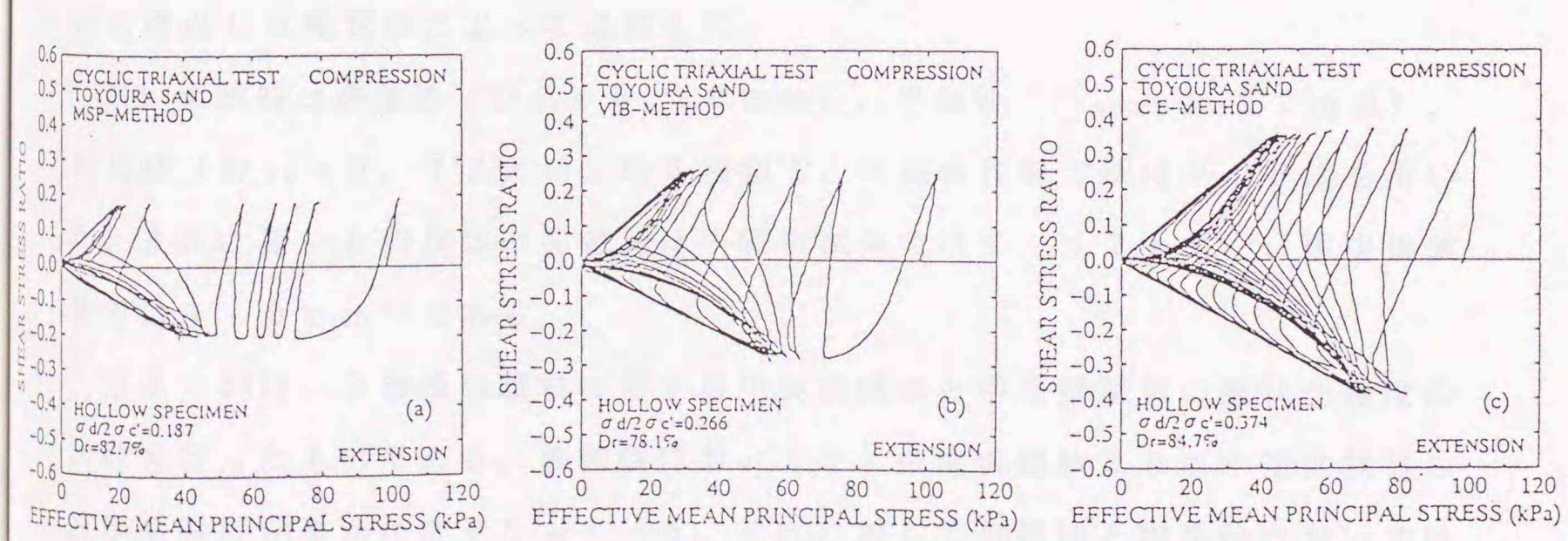


図３－47　繰返し三軸試験における有効応力経路（豊浦砂）
(a)ＭＳＰ供試体(b)ＶＩＢ供試体(c)ＣＥ供試体

３．６．２　供試体形状の影響

３．６．１で三軸試験と中空ねじり試験の結果の比較において、液状化強度に及ぼす供試体形状の影響を除くために、中空の供試体を用いて比較を行った。しかし、通常の三軸試験は中実の供試体を用いて試験が行われるので、供試体の形状によってどの程度液状化強度が変化するかを調べた。

砂のような粒状材料を用いて液状化試験を行う場合、その試験結果に及ぼす影響としてメンブレンペネトレーション（以下ＭＰ）の影響が挙げられる。非排水状態で試験を行う場合、等体積条件であるべき非排水試験において、間隙水圧の上昇にともなう有効応力の変化によってＭＰ量が変化するため、等体積条件が満足されなくなる。液状化強度に対しては、ＭＰの影響が大きくなると間隙水圧の発生が抑制され強度が過大に評価されてしまう。このＭＰの影響は同じ試料を用いた場合には、供試体直径が小さいほど、すなわち供試体体積あたりのメンブレンで覆われる表面積の比（以下面積比と略）が大ききほど影響は大きくなる。また、同じ直径の供試体を用いた場合でも試料の粒径が大きくなるほど影響が大きくなることが、Martinら（1978）や時松ら（1986）によって指摘されている。

これまで、三軸試験と中空ねじり試験による再構成砂の液状化強度を比較する際、供試体の形状の影響を避けるため中空の供試体を用いた比較を行った。しかし、通常は中実の供試体に対して三軸試験が行われる。そこで、実際に供試体の形状や用いる粒子径が異なることによってどの程度液状化強度が変化するかを、粒径の異なる３種類の砂試料を用いて、中実供試体と中空供試体を用いた繰返し三軸試験によって比較した。

用いた試料は豊浦砂（D_{50}＝０．１８ｍｍ）、当別砂（D_{50}＝０．３２ｍｍ）、相馬砂（D_{50}＝０．７３ｍｍ）の３種類で、供試体作製方法はＶＩＢ法を用いた。また、用いた供試体の面積比は中実供試体では０．５７ｃｍ$^{-1}$、中空供試体では１．０ｃｍ$^{-1}$である。

図３－48は、３種類の試料に対する中実供試体と中空供試体の液状化強度の比較を行ったものである。豊浦砂においては、中実供試体よりも中空供試体の液状化強度が僅かに高くなっている。それに対して当別砂と相馬砂においてはその差が顕著に認められる。したがって、中空供試体から得られた液状化強度

は粒径の大きな試料を用いるほど液状化強度を過大評価していることが分かる。

そこで、粒径が異なることによってどの程度液状化強度が変化するかを図３－49に示す。図では、載荷回数３０回でＤＡ＝５％が得られる中実供試体と中空供試体での繰返し応力比の比と平均粒径との関係を示している。図中にはLadeら（1977)とMartinらの結果もプロットしている。LadeらはMonterey sand（D_{50}＝０．６２ｍｍ）を用いて直径３．６ｃｍ（面積比：１．１ｃｍ$^{-1}$）と７．１ｃｍ（面積比：０．５６ｃｍ$^{-1}$）の中実供試体で繰返し三軸試験を行った。この供試体の面積比は本研究で用いた中空および中実供試体の面積比にほぼ等しい。また、MartinらはLadeらが用いた供試体径を含む種々の供試体直径に対して粒径が異なることによって載荷回数３０回で初期液状化が起こる応力比がどの程度過大に評価されるかを示した。

図より、明らかに粒径大きくなると、中空供試体の液状化強度は中実供試体を用いたそれよりも過大に評価されることが分かる。また、本研究結果とLadeらおよびMartinらの結果も良い対応を示している。このことから、供試体の面積比が異なる供試体でしかも粒子径が比較的大きい試料を用いる場合は、ＭＰの影響を考慮した比較を行わなければならないことが分かる。

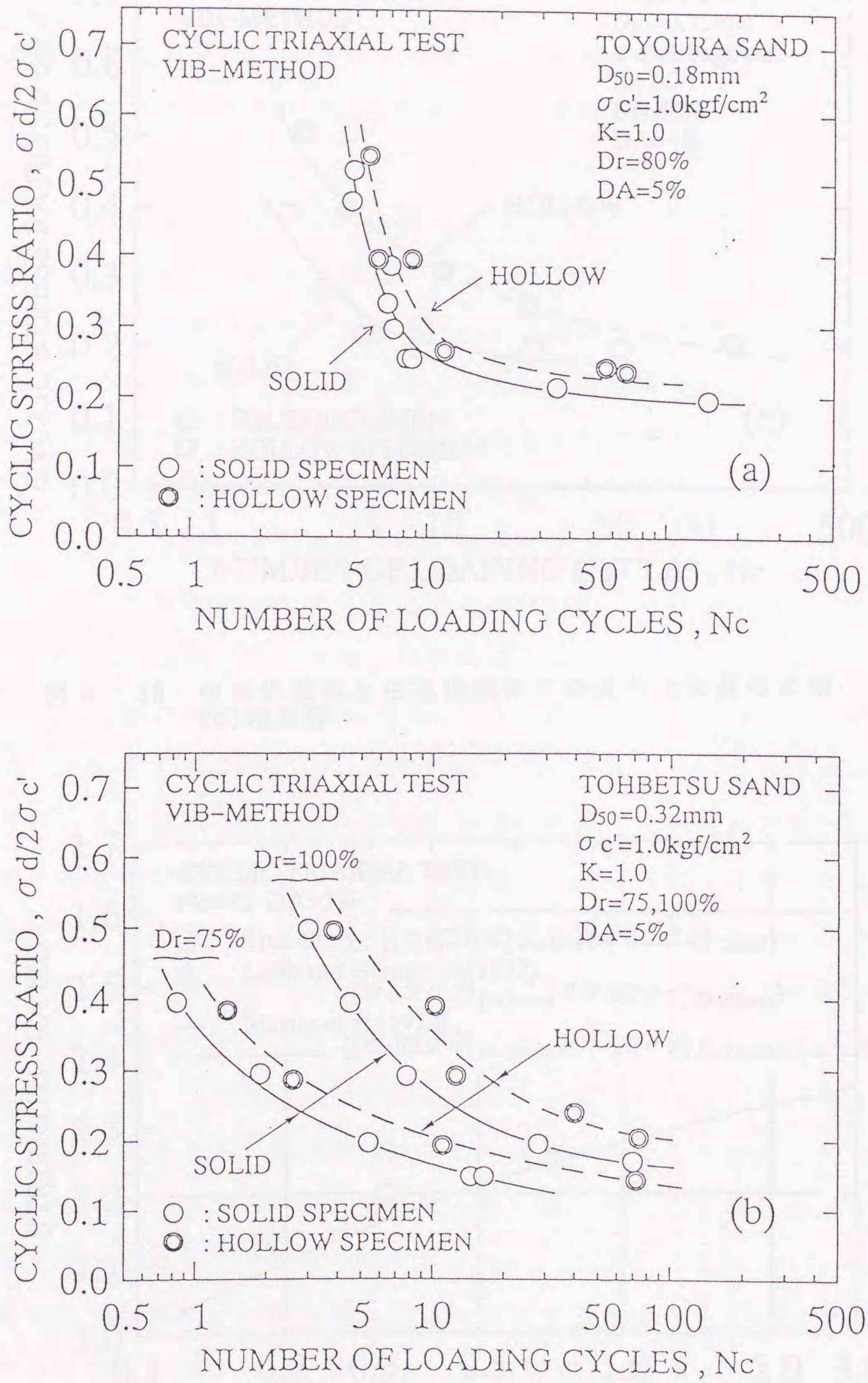


図３－48　中実供試体と中空供試体での液状化強度の比較
(a)豊浦砂(b)当別砂

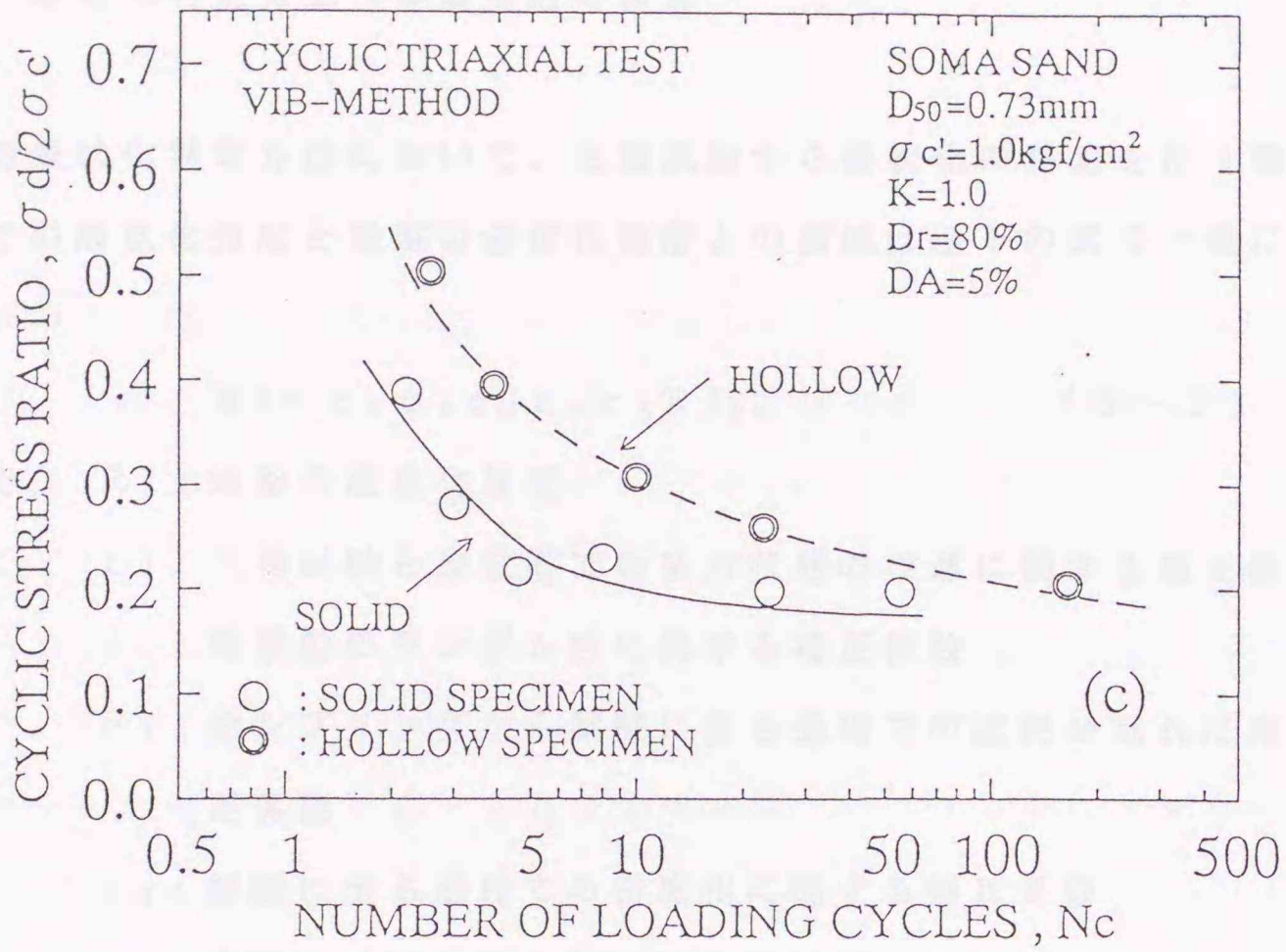


図 3 － 48　中実供試体と中空供試体での液状化強度の比較
(c)相馬砂

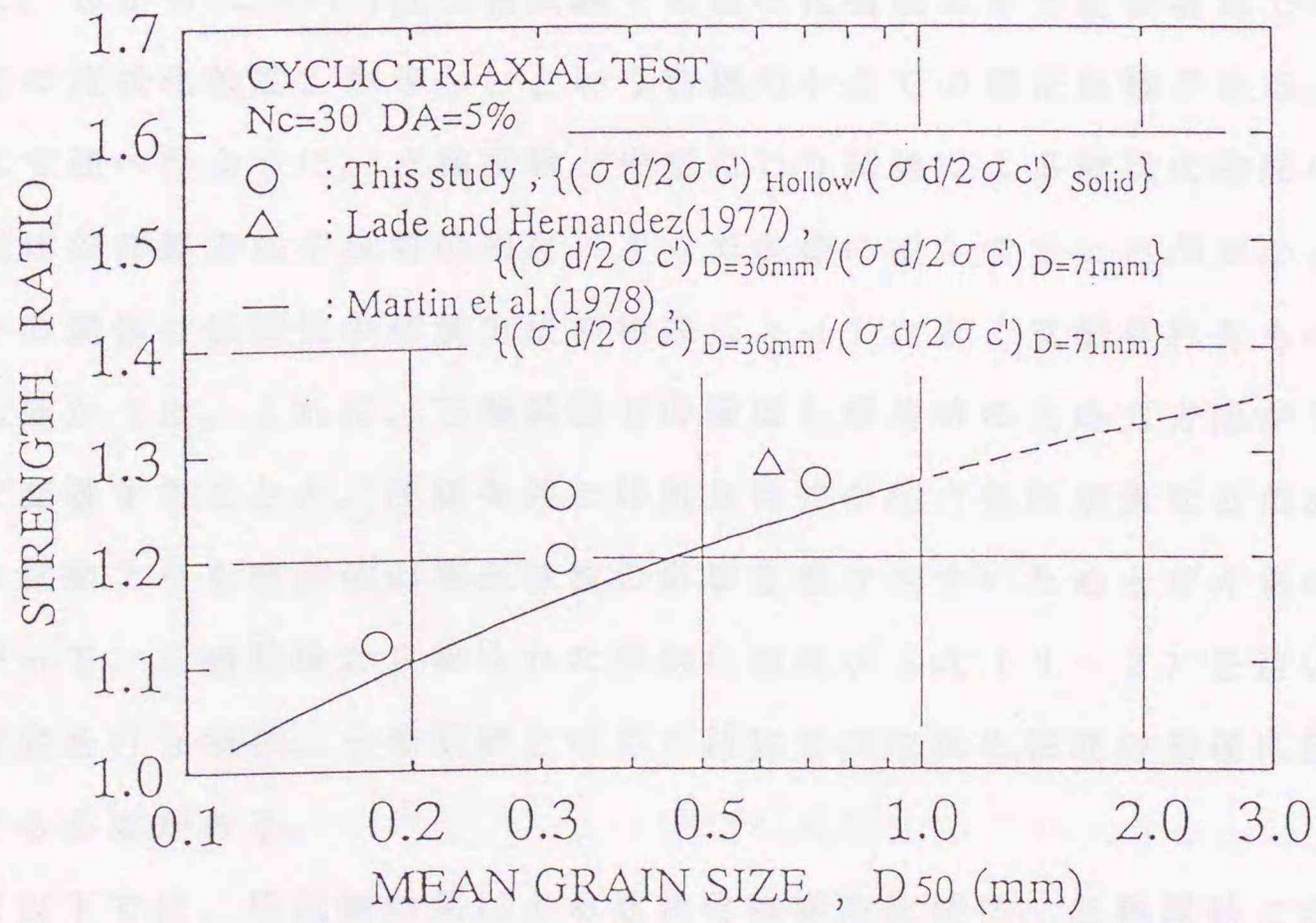


図 3 － 49　平均粒径の相違が液状化強度に及ぼす影響

３－７　液状化判定方法への適用性の検討

現状の液状化判定方法において、三軸試験から液状化の判定を行う場合、三軸試験での液状化強度と地盤の液状化強度との関係は以下の式で一般に表されている。

$$RI = c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 Rl_{20} \qquad (3-2)$$

ここで、　RI：地盤の液状化強度

c_1：三軸試験と原位置での応力状態の相違に関する補正係数

c_2：地震動のランダム性に関する補正係数

c_3：サンプリングから試験に至る過程での試料の乱れに関する補正係数

c_4：試験に至る過程での密度化に関する補正係数

c_5：地震動の水平面での２次元性に関する補正係数

Rl_{20}：三軸試験での繰返し載荷２０回での繰返し応力比

上記の補正係数の中でc_1に関しては、３．５節で述べたように供試体作製方法や試料によらず石原らが示した補正係数（１＋２Ｋ）／３で表されることが示された。しかし、このc_1は三軸試験での液状化強度と等方圧密状態でのねじり試験での液状化強度とが等しいという前提のもとでの補正係数である。

これまで述べたように、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の関係は、供試体の作製方法や試料の相違によって多様に変化することが分かった。また、その関係は供試体の作製方法の種類によって大きく支配されるものであることも分かった。これは、三軸試験での繰返し載荷時の主応力方向が０°と９０°で交番することと、圧縮条件と伸張条件での応力条件が異なるため、中空ねじり試験よりも供試体の構造特性の影響を受けやすいためと考えられた。

したがって、三軸試験から得られた液状化強度から式（３－２）を用いて液状化の判定を行う場合、三軸試験とねじり試験での液状化強度の相違に関する補正をする必要がある。

そこで以下では、両試験結果による液状化強度の比較に、三軸試験での圧縮条件と伸張条件での応力条件の相違の影響を考慮に入れた定量的な比較を行い、現状の三軸試験を用いた液状化判定方法への適用性を検討する。

先に図３－46，47で示したように、供試体の作製方法の相違によって三軸試験での変形特性および間隙水圧発生特性が大きく異なることが分かった。この特性の相違は供試体の構造特性の相違によるものである。また、圧縮側よりも伸張側に変形もしくは間隙水圧が発生しやすい供試体ほど、三軸試験による液状化強度は中空ねじり試験による液状化強度よりも低くなることも示された。

そこで、三軸試験による液状化強度に及ぼす構造異方性の影響を定量的に評価するために、図３－50に示す２つのパラメータ、軸ひずみ比$\varepsilon_{a\cdot comp.}/DA$および間隙水圧比$U_{1\cdot comp.}/U_1$を採用した。ここで軸ひずみ比とは、三軸試験時の両振幅軸ひずみＤＡが５％に達したときの圧縮側での軸ひずみ量の割合である。また、間隙水圧比$U_{1\cdot comp.}/U_1$とは、繰返し載荷第１サイクルでの最初の半サイクル（圧縮時）で残留する間隙水圧と第１サイクル全体で残留する間隙水圧との比である。

図３－51は、軸ひずみ比$\varepsilon_{a\cdot comp.}/DA$と三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比$(\tau_{cy}/\sigma_c')/(\sigma_d/2\sigma_c')$との関係を示したものである。ここで、$(\tau_{cy}/\sigma_c')$は中空ねじり試験において載荷回数２０回で両振幅せん断ひずみが７．５％が発生したときの繰返し応力比、$(\sigma_d/2\sigma_c')$は三軸試験において載荷回数２０回で両振幅軸ひずみが５％が発生したときの繰返し応力比である。なお、この図において三軸試験および中空ねじり試験での液状化強度は全て中空供試体を用いた結果である。

図から、三軸試験における軸ひずみ比が増加するとともに液状化強度比は減少していることが分かる。また、軸ひずみ比と液状化強度比の間に試料の種類や供試体作製方法によらない一義的な関係が存在している。

軸ひずみ比と液状化強度比との比較と同様に間隙水圧比と液状化強度比との関係を図３－52に示す。この関係においても試料や構造によらない一義的な関係が存在することが分かる。

このように、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の関係を本研究で採用したパラメータを用いることによって定量的な比較ができることが示された。したがって、三軸試験から得られる液状化強度から評価されている現在の液状化判定法に対して、図３－51，52に示した関係を用いることによって、より的確な地盤の液状化強度の評価が可能になると考えられる。すなわち、三軸

試験を行った際に、軸ひずみ比もしくは間隙水圧比を求め、その値から図３－51，52中のラインとの交点での強度比を読みとり、三軸試験での液状化強度にその強度比を乗じることによって、三軸試験と単純せん断条件での液状化強度の相違に対する補正を行うことができる。

次に、上記で得られた関係が不攪乱試料や他の機関で行われた試験結果と一致するかを検証するために、石狩Ｎｏ１，２試料を用いた結果と龍岡ら(1986)が浅間山砂に対して行ったＤｒ＝８０％の試験結果との比較を行った。ここで、不攪乱試料と龍岡らの三軸試験の結果は、中実供試体を用いた結果であるので、比較のためにＭＳＰ供試体およびＶＩＢ供試体での三軸試験の液状化強度も中実供試体で得られた結果を用いた。なお、龍岡らが行った試験は直径７．５ｃｍの中実供試体での三軸試験と外径１０ｃｍ、内径６ｃｍの中空供試体でのねじり試験で、供試体作製方法としては、図３－53に示すような４種類の方法を用いている。

図３－54にその結果を示しているが、図中に示した中空供試体のみから得られた結果（図３－51のライン）に比べ、軸ひずみ比と強度比との関係は大きくばらついていることが分かる。特に、浅間山砂、当別砂、相馬砂で行った試験結果は図３－51に対する平均曲線よりも上に位置している。この主な理由は３．６節で述べたように、中実供試体と中空供試体の面積比が異なるため、粒径の大きな試料では中空ねじり試験による液状化強度が三軸試験よりも過大に評価されたためと思われる。これらの砂の平均粒径は浅間山砂が０．３９ｍｍ、当別砂が０．３２ｍｍ、相馬砂が０．７３ｍｍであり、豊浦砂（０．１８ｍｍ）よりも大きい。また、この図で注目されることは、不攪乱試料（石狩ＮＮｏ．１，２砂）においても図３－51で得られた線上にほぼ一致していることである。石狩No.1砂（D_{50}＝０．２７ｍｍ）と石狩No.2砂（０．１３ｍｍ）の不攪乱試料の平均粒径が豊浦砂のそれとに近いことからも、軸ひずみ比と液状化強度比との間には再構成試料、不攪乱試料によらず一義的な関係があることが分かる。

ただし、浅間山砂においては粒径の影響では説明できないほどのばらつきが認められる。浅間山砂においては、供試体作製方法の相違によって三軸試験での液状化強度および軸ひずみ比は余り変化しないのに対し、ねじり試験での液状化強度は三軸試験よりも変化することを龍岡らは示している。したがって、

本研究で用いた供試体作製方法以外の方法、または異なる試料を用いた場合には、軸ひずみ比と強度比の関係は図３－51で示したユニークなラインよりもある範囲を持った関係になるかも知れない。今後、より多くの供試体作製方法や試料を用いた試験を行い、より一般的な関係を見いだす必要があると思われる。

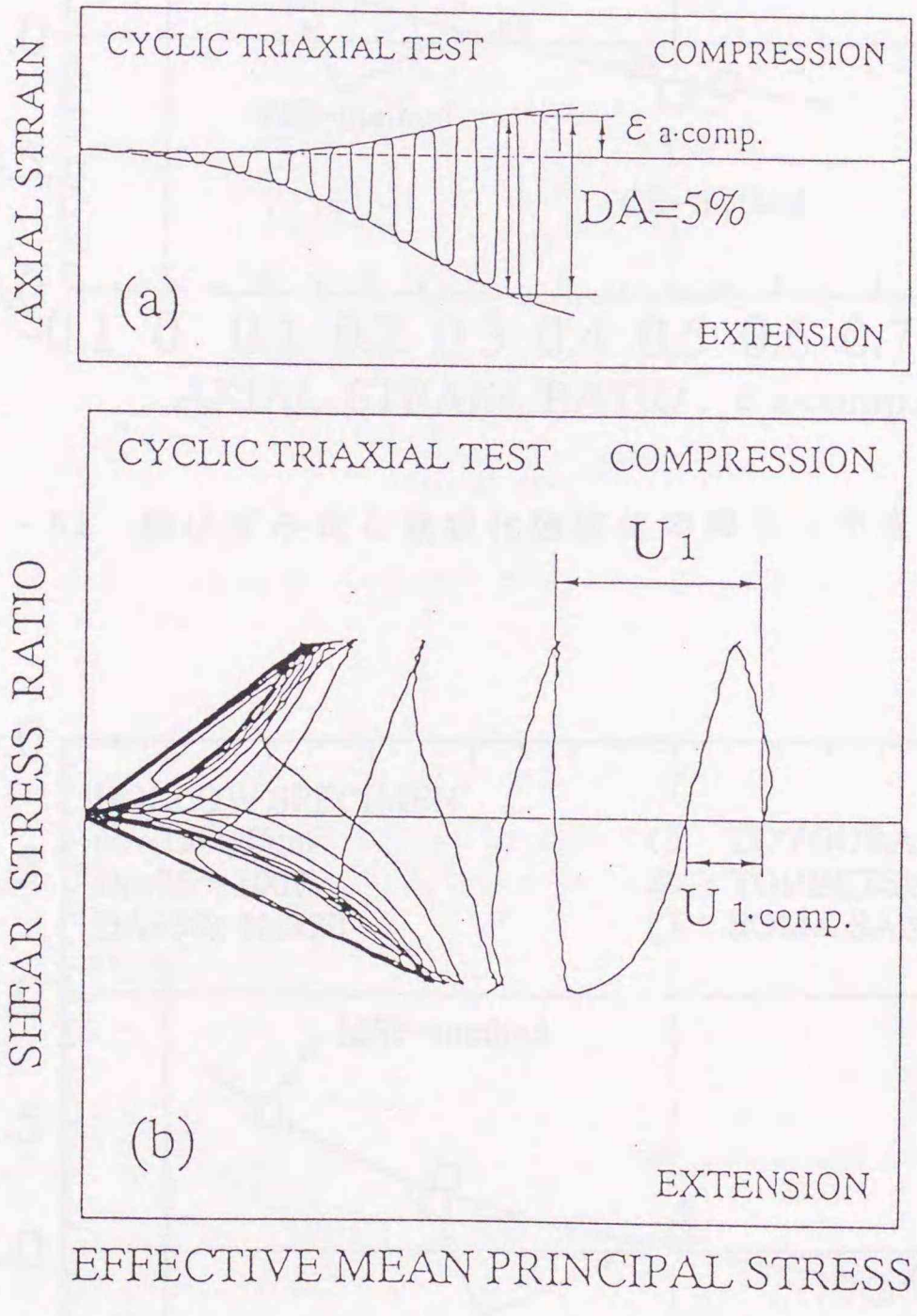


図３－50　(a)軸ひずみ比 $\varepsilon_{a\cdot comp.}/DA$ (b)間隙水圧比 $U_{1\cdot comp.}/U_1$ の定義

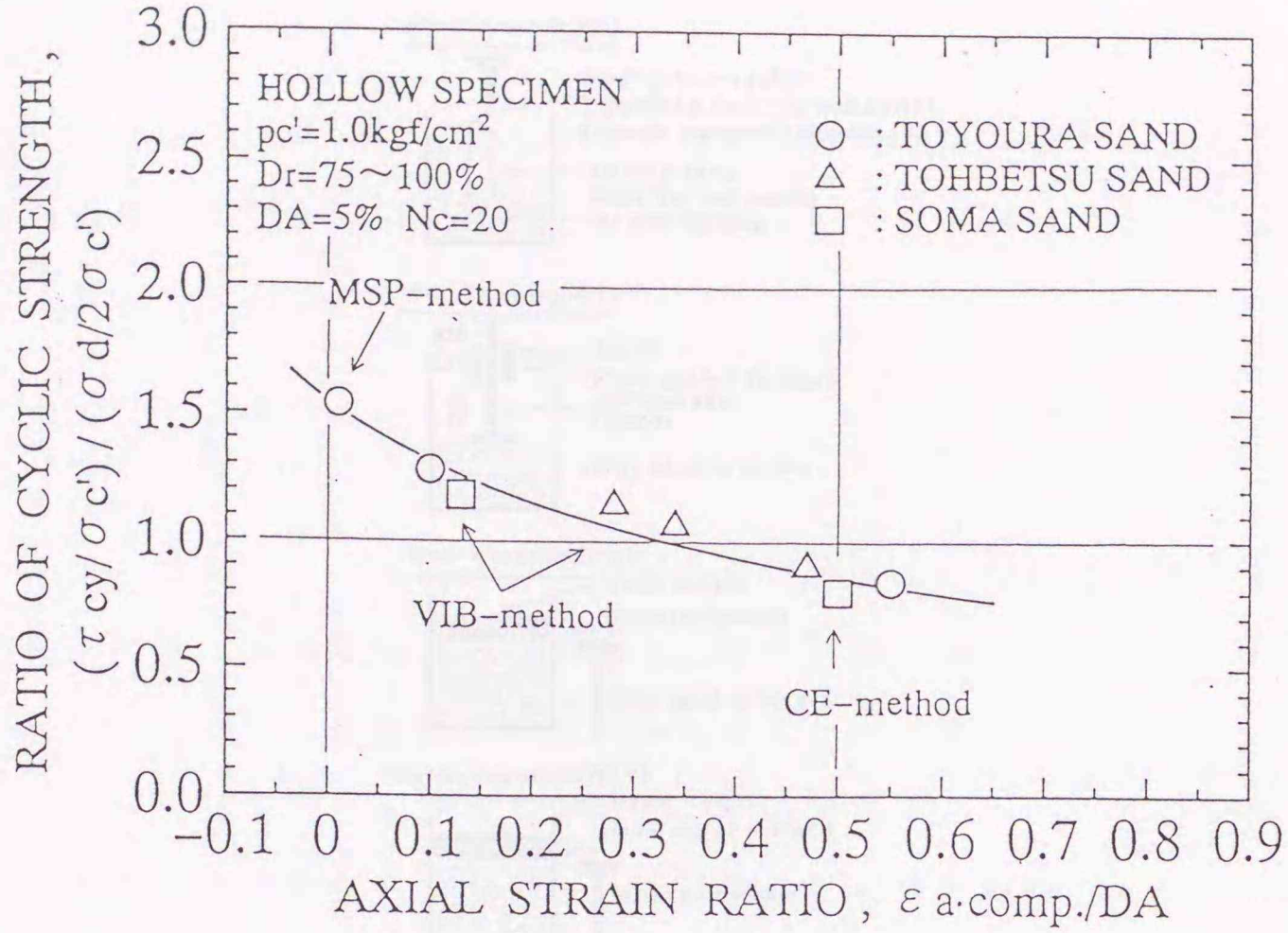


図３－51　軸ひずみ比と液状化強度比の関係（中空供試体）

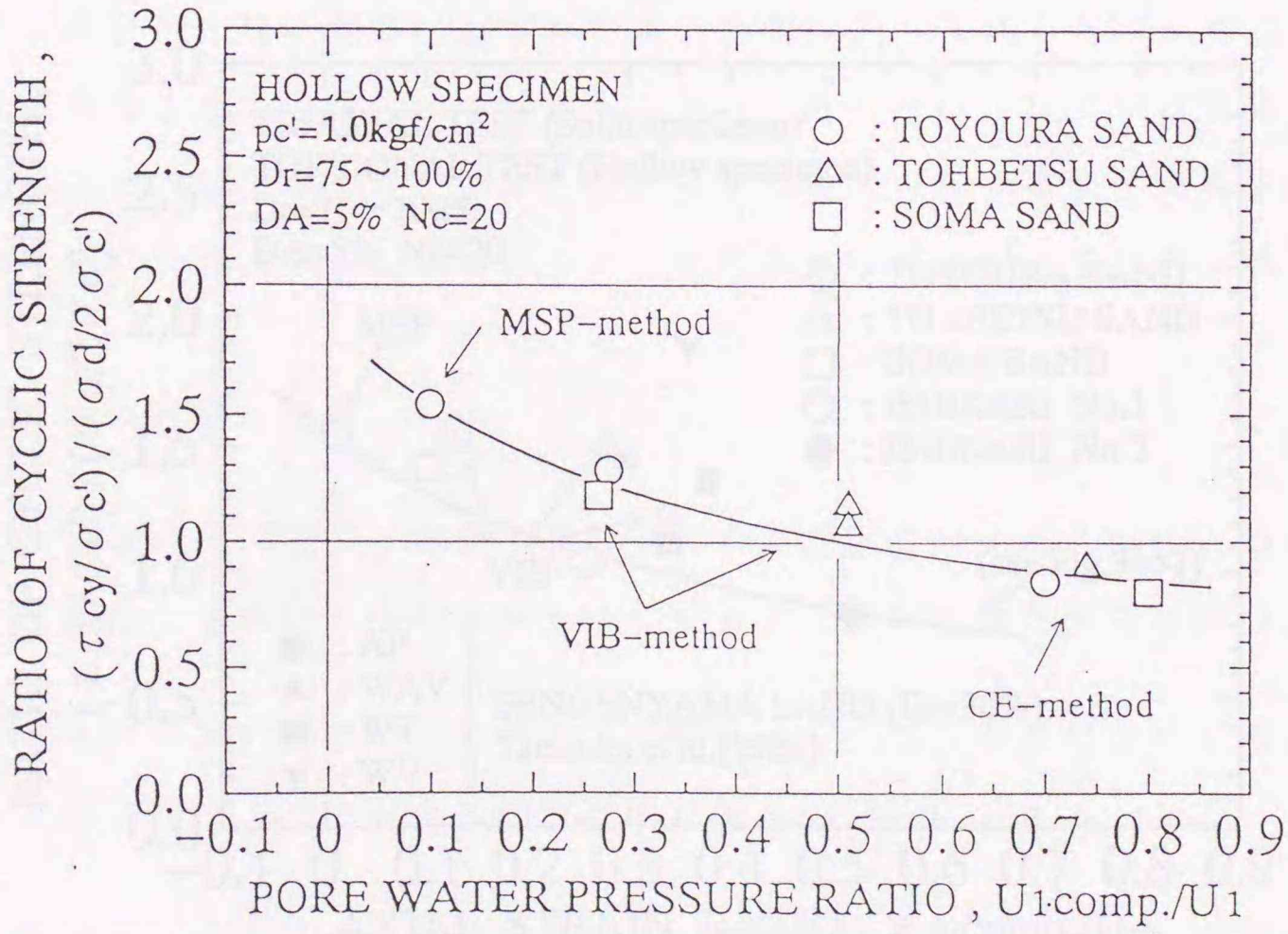


図３－52　間隙水圧比と液状化強度比の関係（中空供試体）

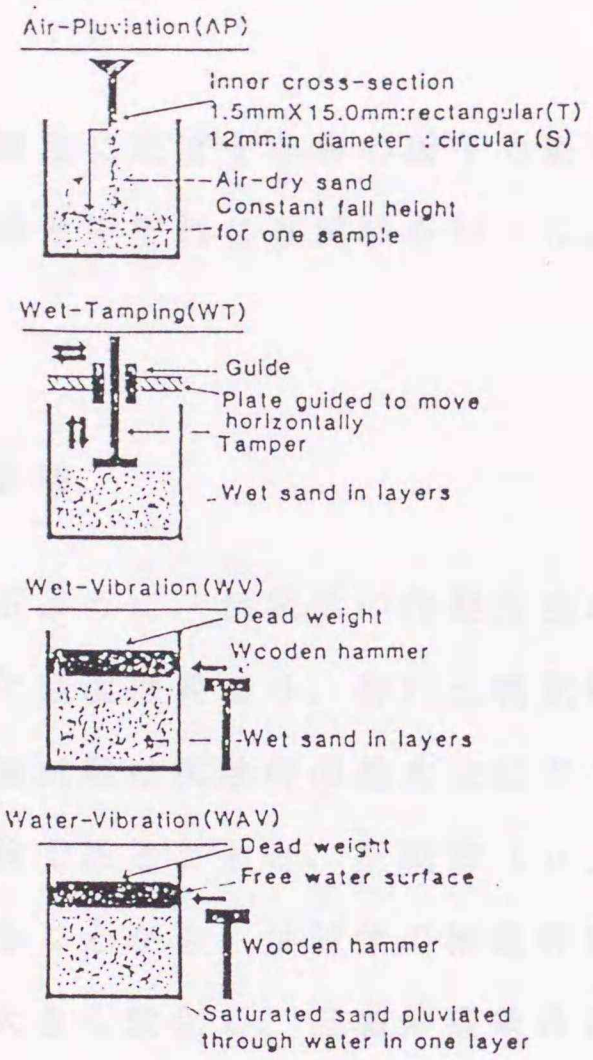


図３－53　龍岡ら（1986）が用いた供試体作製方法

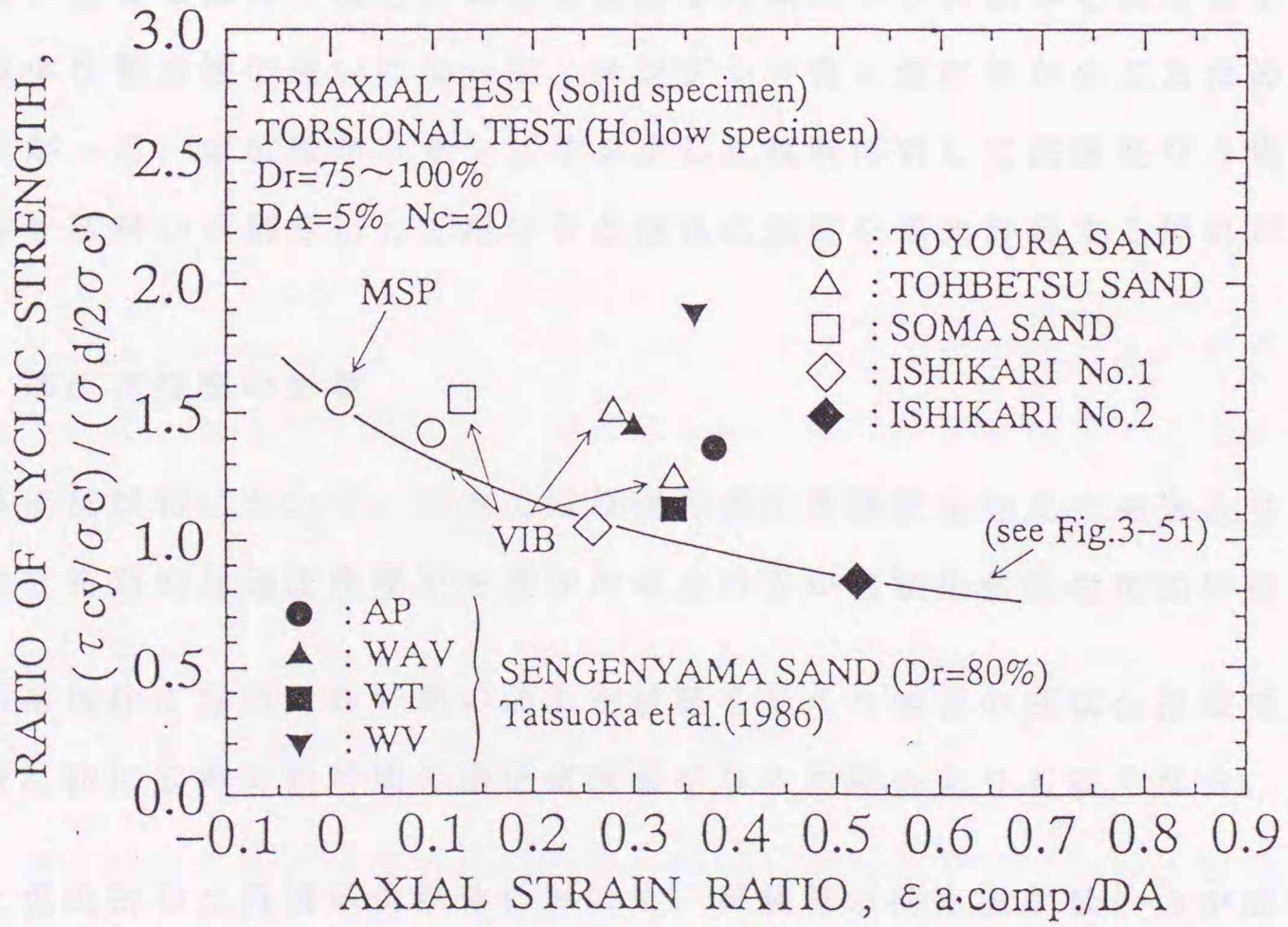


図３－53　軸ひずみ比と液状化強度比の関係
（三軸試験：中実供試体、ねじり試験：中空供試体）

３．８　本章のまとめ

室内試験による液状化強度に及ぼす各種の因子の影響を調べるために、数種の砂試料を用いて三軸試験と中空ねじり試験を行った。得られた結果を要約すると以下のようになる。

（１）供試体作製方法の影響

１）従来から言われているように、供試体の作製方法の相違すなわち構造異方性の相違によって液状化強度は異なり、特に三軸試験においてその差が顕著に現れた。これは、三軸試験は試験時の最大主応力方向が鉛直方向と水平方向に９０°交番する試験であることと、圧縮時（$\sigma_2 = \sigma_3$）と伸張時（$\sigma_1 = \sigma_2$）の応力状態が異なることから、供試体の構造特性の相違によって圧縮時と伸張時の変形特性が大きく変化し、三軸伸張条件に対して弱い構造を持つ供試体ほど液状化強度が低くなったものと考えられる。

２）基本的に同じ初期構造を持つと思われるＭＳＰ供試体とＲ$_B$Ｖ供試体で強度差が生じるのは、後者における凍結した試料から供試体を削り出すという供試体作製方法の違いによって、メンブレン貫入量に差が生じるためである。したがって、原位置からサンプリングした試料に対して試験を行う場合、供試体を試料から削り出して用いると液状化強度を過大評価する恐れがある。

（２）過圧密履歴の影響

１）不攪乱試料において、室内で短時間の過圧密履歴を与えた場合よりも、原位置で長期的な過圧密履歴を受けた場合の方が液状化強度の増加率は大きい。

２）再構成砂に室内で短時間の過圧密履歴を与えた場合の液状化強度増加率は、不攪乱砂に室内で短時間の過圧密履歴を与えた場合よりも高くなる。

３）正規圧密した再構成供試体において、試験時の拘束圧が低い方が液状化強度が高くなった。ただし、応力比が高く載荷回数の少ないところで拘束圧の

相違の影響が現れるが、応力比が低くなり載荷回数が増加するとその差は少なくなる。

４）過圧密履歴による液状化強度の増加率は、三軸試験、中空ねじり試験によらず同じ大きさの強度の増加率を示した。

（３）異方圧密履歴の影響

１）ＭＳＰ供試体においては、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、過圧密履歴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受けた異方的な圧密履歴、特に伸張履歴は、その後に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）と、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、最大主応力比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）供試体の初期構造によって、三軸試験による液状化強度に及ぼす異方圧密履歴の影響の程度は異なる。三軸伸張条件の異方圧密履歴を与えると、ＭＳＰ供試体やR_BV供試体では液状化強度が著しく増加するのに対し、他の供試体作製方法ではＭＳＰ供試体のような大きな液状化強度の変化は認められなかった。ただし、ある程度以上の大きさのひずみ履歴（Ｋ＝０．３）が与えられると、R_BH供試体の液状化強度が低下した。

５）三軸試験による液状化特性は、供試体の三軸伸張条件での強度特性に大きく支配される。したがって、異方圧密履歴による液状化強度の変化の相違は、異方圧密履歴によって導入された供試体のダイレイタンシー特性の相違と、

三軸圧縮と伸張条件での変形特性の変化の相互作用によって決まると考えられる。

6）中空ねじり試験においては、供試体の作製方法によらず異方圧密履歴の影響は認められなかった。これは異方圧密時の主応力の方向（０°，９０°）と繰返し載荷時の主応力方向（±４５°）が異なるため、三軸試験のような大きな影響が現れなかったものと考えられる。

（４）三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較

1）石原らが示した、三軸試験による液状化強度に対する、試験時と原位置の拘束条件の相違による補正係数$C_1=(1+2K_0)/3$は、試料および供試体作製方法によらないことが分かった。

2）今回用いた不攪乱試料においては、両試験による液状化強度に統一的な関係は認められず、試料の相違、すなわち構造の相違によって両試験による液状化強度の関係は異なる。

3）再構成供試体の三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の相互関係は、供試体作製方法および試料の相違によって複雑に変化する。全体的にみると、ＭＳＰ法で作製した供試体では三軸試験による液状化強度は中空ねじり試験による液状化強度よりも低いのに対し、ＣＥ法で作製した供試体では三軸試験による液状化強度の方が高くなっている。また、同じ供試体作製方法を用いても試料の相違によって両試験の関係はやや異なることが分かった。

4）中実供試体と中空供試体を用いた三軸試験結果から、豊浦砂程度の粒径の砂では面積比の相違によるＭＰの影響の違いが顕著に現れないが、当別砂や相馬砂のように粒径が大きくなるとＭＰの影響により、中空供試体を用いた三軸試験による液状化強度が中実供試体を用いた強度よりも高くなった。

（５）液状化判定方法への適用性の検討

1）三軸試験での供試体の異方性の程度を現すパラメータとして軸ひずみ比

$\varepsilon_{a\cdot comp.}$／ＤＡおよび間隙水圧比$U_{1\cdot comp.}/U_1$を採用し、中空ねじり試験と三軸試験による繰返し強度比$(\tau cy/\sigma c')/(\sigma d/2\sigma c')$との関係を調べた結果、軸ひずみ比および間隙水圧比と繰返し強度比とは密接に関係しており、供試体の作製方法および試料に依らない一義的な関係が存在することが明らかにされた。

2）本研究で採用したパラメータを用いることによって、三軸試験から得られた液状化強度から現状よりもより的確な地盤の液状化強度の推定が可能となった。

第4章　繰返し変形特性に影響を及ぼす諸因子

4.1　概　説

土質材料は金属材料と異なり、その特有の性質により強い非線形性を示す。微少なひずみレベルにおいては、ほぼ弾性的な挙動を示すのに対して、ひずみレベルが大きくなるに従って、その剛性は低下し減衰は増加する強いひずみ依存性を示す。また、実際の地盤内の土要素においても、交通荷重や地震動、杭振動、液状化が発生するような大地震等、地盤はその状況によって、広範なひずみレベルの振動を受ける。したがって、原位置における土要素の繰返し荷重による変形特性を正確に評価するためには、土要素が受けるひずみおよび応力状態をできるだけ忠実に再現し、その状態での力学的諸性質を調べるとともに、試験結果に及ぼす各種因子の影響を検討する必要がある。

繰返し変形特性を室内試験から求める方法としては、共振法試験、超音波パルス試験、三軸試験、中空ねじり試験等が挙げられるが、それぞれの試験装置において問題がある。例えば、測定できるひずみの範囲は、超音波パルス試験が10^{-6}程度、共振法試験は10^{-4}程度以下である。また、三軸試験や中空ねじり試験は微小なひずみレベルでの変形特性の測定には困難があった。したがって、各種試験装置間の測定できるひずみの範囲が異なることや、試験基準が未だ策定されていないため、機関によって試験方法が異なり、異なる試験機関での試験結果の比較ができない等の問題がある。また、試験結果に及ぼす各種影響因子が定量的に評価されておらず、どのような点に注意を払って試験を行い結果を整理すべきなのか明らかにされていない面が多い。

そこで、本研究では三軸試験装置および中空ねじり試験装置の測定精度を向上させることにより、室内試験による砂の繰返し変形特性を微小ひずみレベルから大ひずみ領域まで1つの試験装置から求め、その試験結果に及ぼす諸因子の影響を調べた。4．2節では、供試体作製方法が三軸試験と中空ねじり試験から求めた繰返し変形特性に及ぼす影響について、4．3節では、応力履歴（過圧密履歴、異方圧密履歴、繰返し履歴）が繰返し変形特性に及ぼす影響に

ついて、4．4節では、繰返し載荷時の初期応力状態の影響について、4．5節では、繰返し変形試験において特有な問題である、排水条件、繰返し載荷の波形、載荷回数、ステージ回数等の試験方法が繰返し変形特性に及ぼす影響について調べている。また、4．6節では、三軸試験と中空ねじり試験による繰返し変形特性の比較を行うとともに、三軸試験において問題となるベッディングエラーの影響についても調べている。4．7節では、変形係数を単調載荷試験からも求め、繰返し載荷試験から得られる変形係数との比較を行っている。最後に4．8節で、上記で得られた試験結果の適用性を検討するとともに3章で得られた液状化強度との比較を行っている。

４．２　供試体作製方法の影響

第３章で、液状化強度は供試体作製方法の相違によって大きく異なることを示した。これは、供試体の構造が異なることによって、そのダイレタンシー特性が異なるため、繰返し載荷によって発生する間隙水圧の発生特性が作製方法によって異なるためである。それに対し、間隙水圧が発生しない微小ひずみレベルでの繰返し変形特性については、龍岡ら(1979a)が数種類の供試体作製方法を用いて中空ねじり試験を行い、ばらつきはあるものの大きな影響を及ぼさないことを示している。しかし、龍岡らが試験を行った当時は、試験装置の精度が低く、10^{-6}程度の微小ひずみレベルにおいても確かであるとは言えない。また、実際の地盤から採取した不攪乱試料を用いて繰返し変形特性を求める場合に、一般に地盤に対して鉛直方向から採取した供試体を用いる。したがって、三軸試験の場合には繰返し載荷の方向と地震波によって地盤内の土要素に加わる応力の方向と異なると言える。このことは、弾性波探査試験における波動の方向と地震時のそれとの関係においても言えることである。そこで、本節では三軸試験と中空ねじり試験装置を用いて、供試体の構造が異なることによって得られる繰返し変形特性は変化しないかを調べるために、ＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法で作製した豊浦砂供試体に対して試験を行い供試体の作製方法が試験結果に及ぼす影響を調べた。

なお、本研究では１つの試験装置から10^{-6}程度のひずみレベルから10^{-2}程度のひずみレベルまでの繰返し載荷による変形特性を調べるために、非接触変位計を用いて変形量を測定している。この方法によってどの程度の精度で試験結果が得られるかを図４－１，２に示す。図では三軸試験および中空ねじり試験から得られた応力とひずみのタイムヒストリーと１０サイクル目におけるヒステリシスループを$(\varepsilon a)_{SA}$または$(\gamma)_{SA} \fallingdotseq 3 \times 10^{-6}, 10^{-4}, 10^{-3}$のひずみレベルで示している。微小なひずみレベルで多少の精度の低下が認められるが、広範なひずみレベルで精度良く変形特性が求められることが分かる。

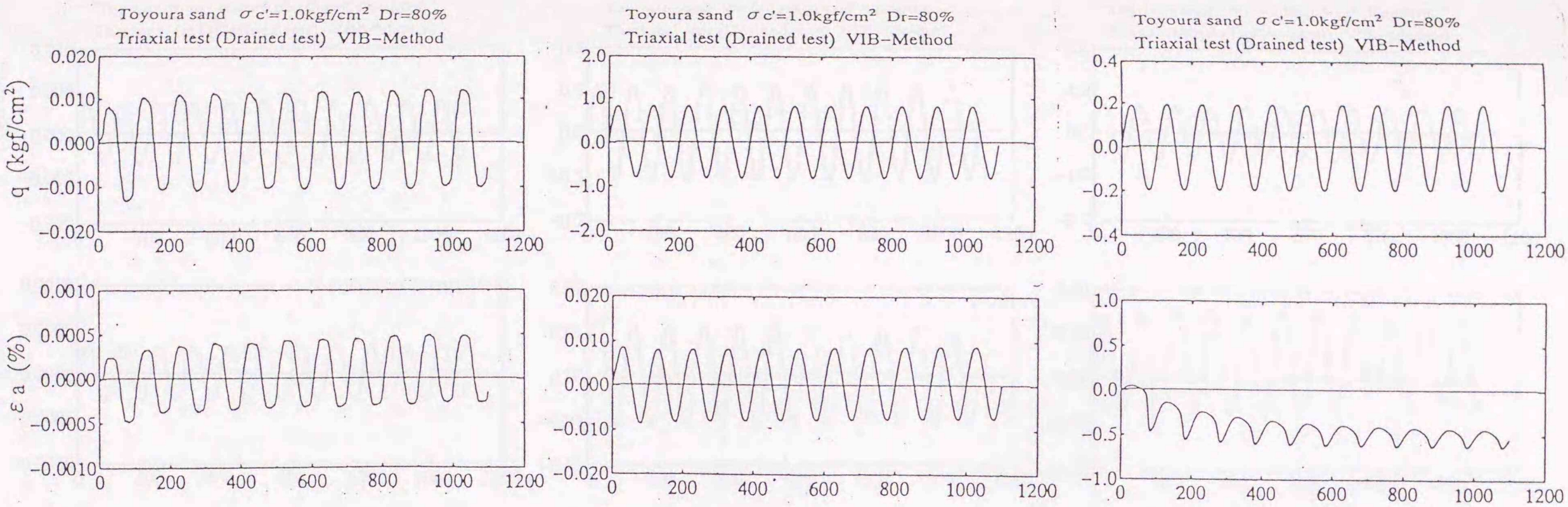


図 4 － 1　三軸試験（排水載荷）における応力とひずみの
タイムヒストリーの典型例

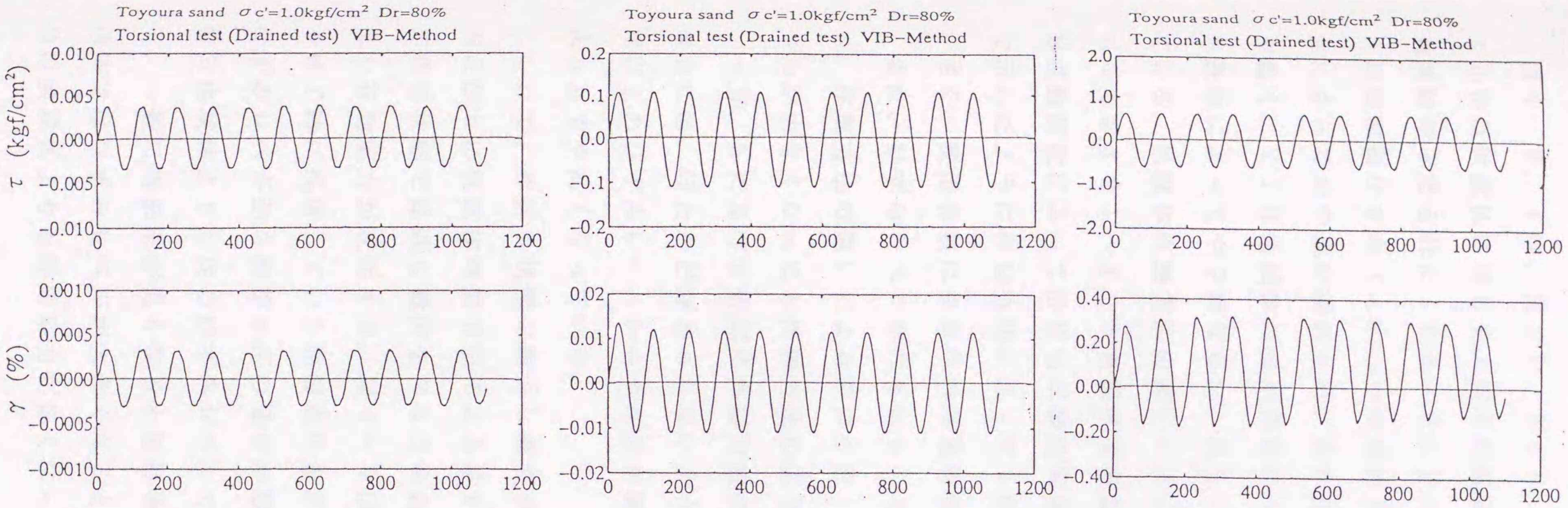


図４－２　中空ねじり試験（排水載荷）における応力とひずみの
タイムヒストリーの典型例

４．２．１　三軸試験

図４－３，４は、ＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法で作製した相対密度Ｄｒ＝８０，６０％の供試体に対して、排水状態および非排水状態で繰返し載荷を与えた三軸試験から得られた１０サイクル目における等価ヤング率Ｅeqおよび減衰比ｈと片振幅軸ひずみ（$\varepsilon a)_{SA}$との関係を示したものである。図より供試体作製方法によってやや差が認められ、排水条件によらずＭＳＰ供試体の変形係数がやや低く、ＶＩＢ供試体の変形係数がやや高くなっている。ＣＥ供試体では、排水条件によってやや異なるが、ＭＳＰ供試体とＶＩＢ供試体の中間の値となっている。供試体作製方法の違いによる変形係数の差は、10^{-6}程度のひずみレベルでおよそ１～１．５割程度である。同じ方法で作製した供試体に対して三軸試験装置によって液状化試験を実施した場合の液状化強度の相違は３．２．１で示したように作製方法によって２倍以上異なるのに対して、変形係数の差は小さく、変形係数は供試体の構造特性の影響を大きくは受けないようである。

また、ひずみレベルが大きなところでは、排水状態で繰返し載荷を与えた場合、作製方法の違いによる差は小さくなっているが、非排水状態ではひずみレベルが大きくなっても作製方法による差はなくならない。

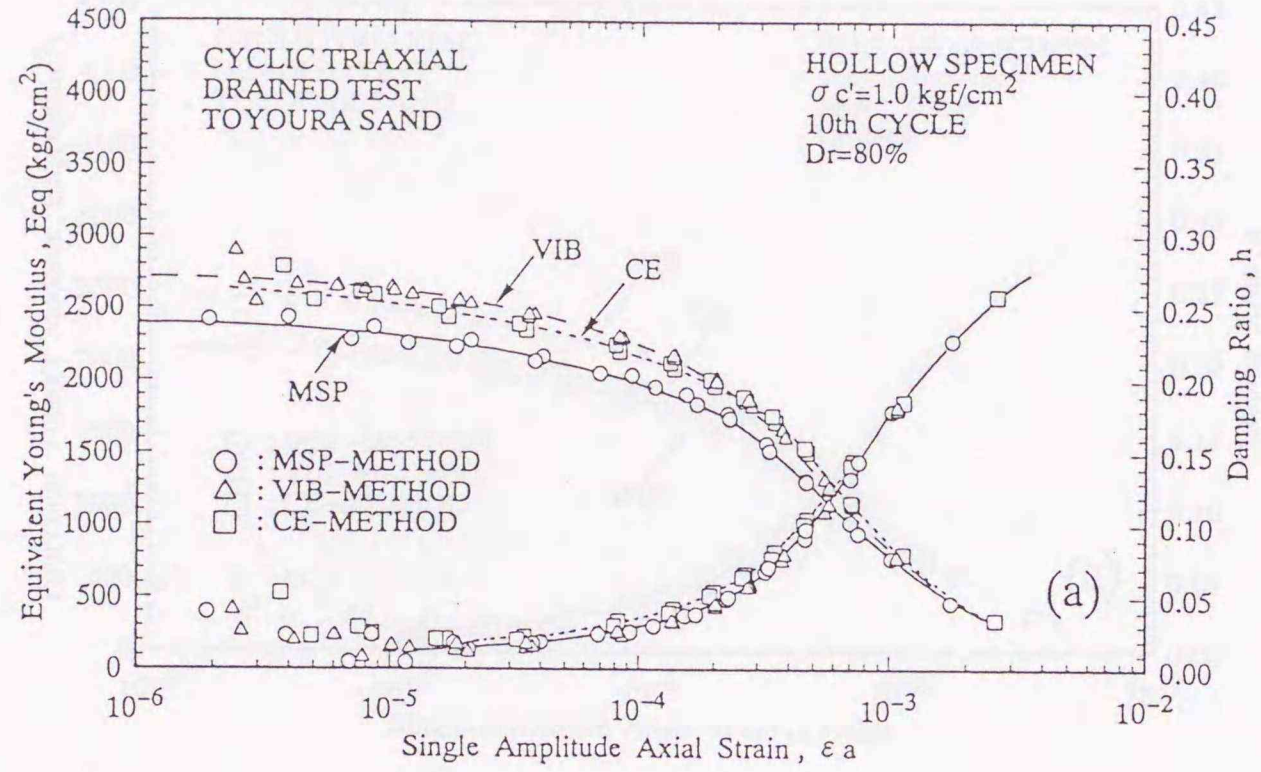
一方、ｈに及ぼす供試体作製方法の影響は、排水状態で繰返し載荷を与えた場合には、ほとんど認められないようであるが、非排水状態では2×10^{-4}程度以上のひずみレベルからやや差が認められ、ＭＳＰ供試体のｈが他の供試体よりもやや高くなっている。

ここで、非排水状態で繰返し載荷を与えた場合ひずみが大きいところでＥeqおよびｈに供試体作製方法による差が認められたのは以下のように考えられる。非排水状態で繰返し載荷を与えた場合、繰返し載荷にともなって間隙水圧が発生し有効応力が変化する。図４－５は各々の載荷段階で繰返し載荷１０サイクル終了時に残留している間隙水圧を示したものである。図から、10^{-4}程度のひずみレベルから間隙水圧の発生が顕著になり、その発生量はＭＳＰ供試体が他の供試体よりも同じひずみレベルで高くなっていることが分かる。したがって、一般に拘束圧が低くなると変形係数は減少しｈは増加するので、ＭＳＰ供試体ではひずみレベルが大きくなると、繰返し載荷１０サイクル目において、他の供試体よりも有効応力が低くなったためＥeqが低下しｈが高くなったもの

と考えられる。

また、図４－６，７にはＥeqを１０$^{-6}$におけるＥeqで正規化した場合について示しているが、排水状態で繰返し載荷を与えた場合には、供試体作製方法の影響はほとんど認められないが、非排水状態ではひずみレベルの大きなところで有効応力の相違によってやや差が生じている。

このように、供試体作製方法が変形定数に及ぼす影響は液状化強度と同様に存在したが、液状化強度に見られたような大きな影響は及ぼさないことが分かる。



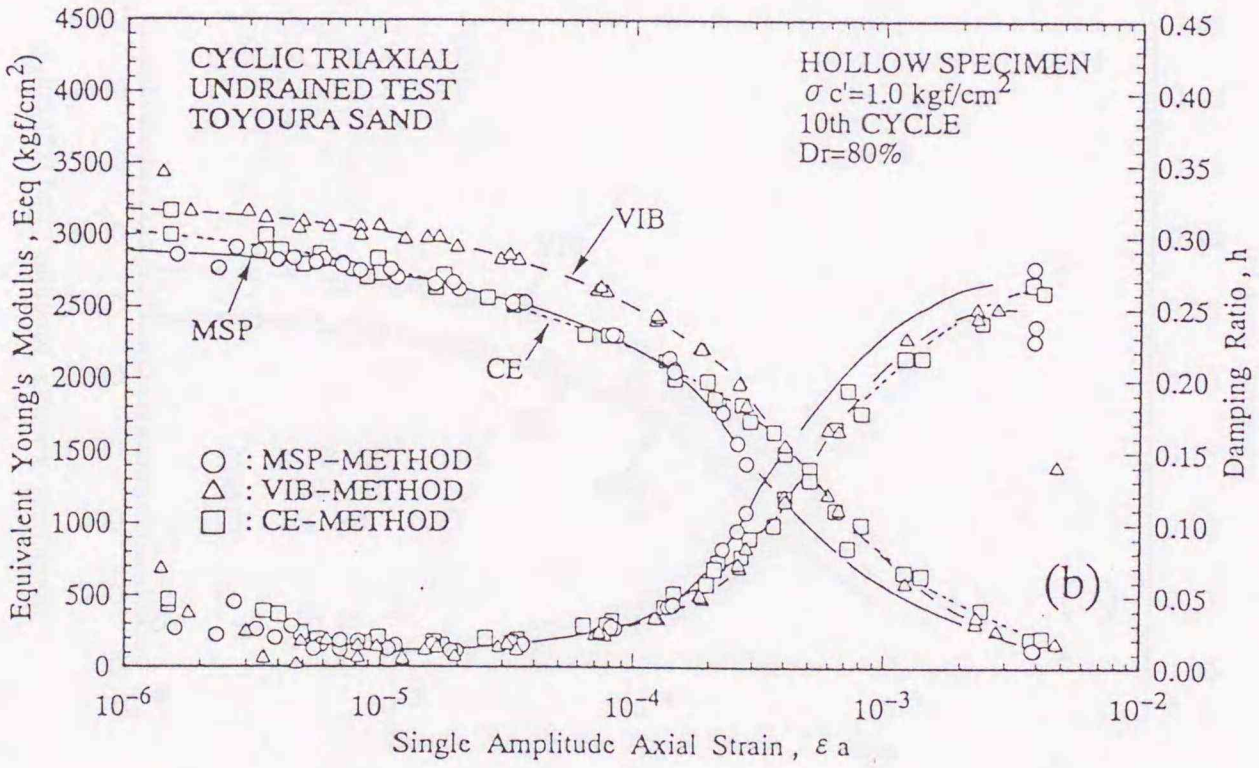
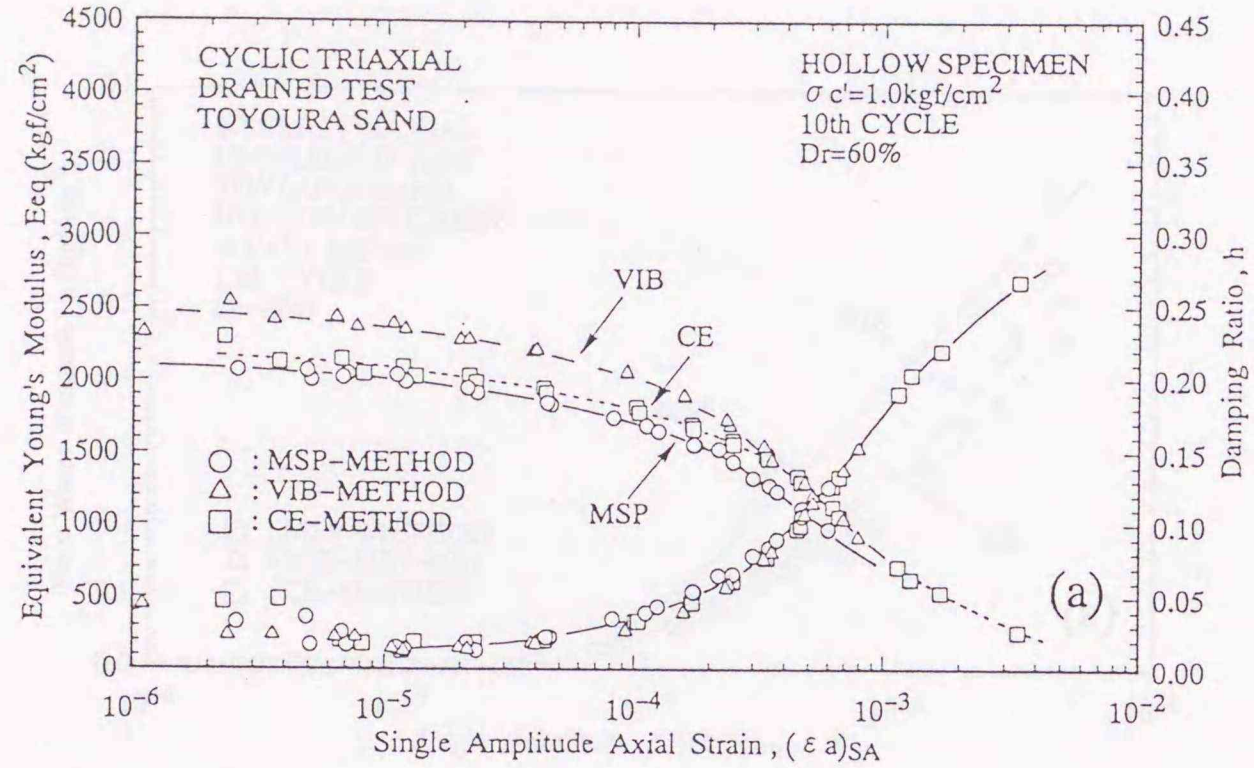


図 4 － 3　供試体作製方法がＥeqおよびｈに及ぼす影響
（三軸試験，Ｄｒ＝８０％）(a)排水載荷　(b)非排水載荷



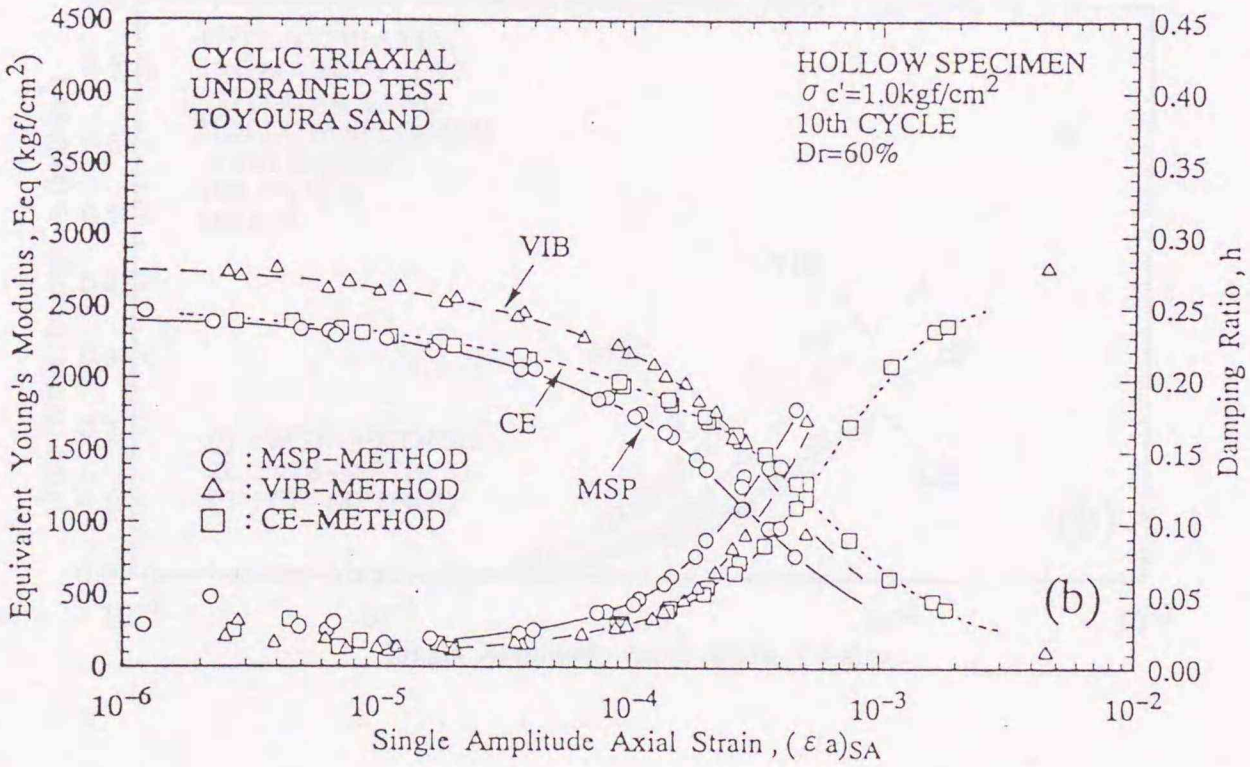
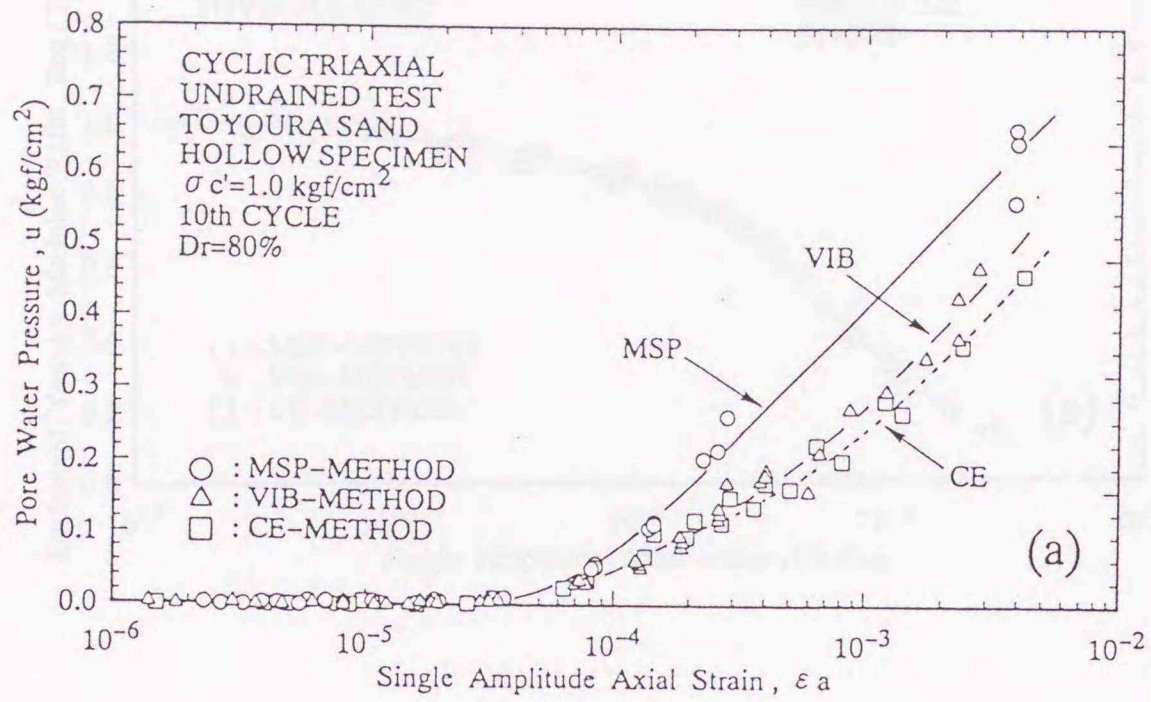


図４－４　供試体作製方法がＥeqおよびｈに及ぼす影響
（三軸試験，Ｄｒ＝６０％）(a)排水載荷　(b)非排水載荷



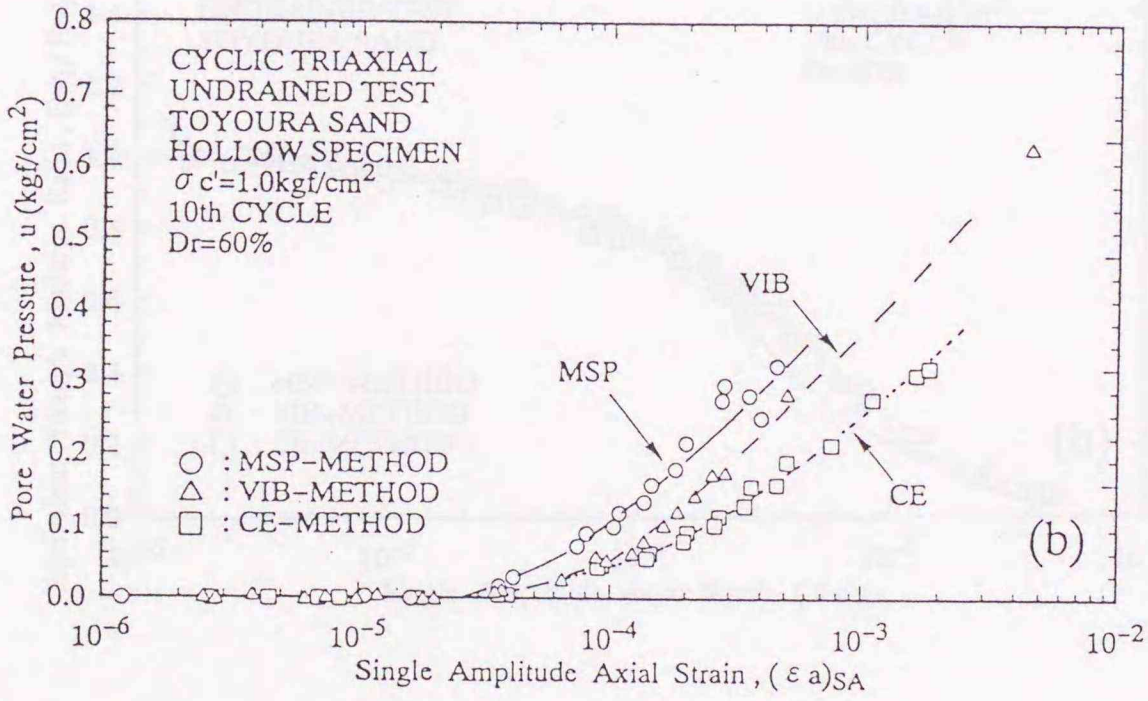
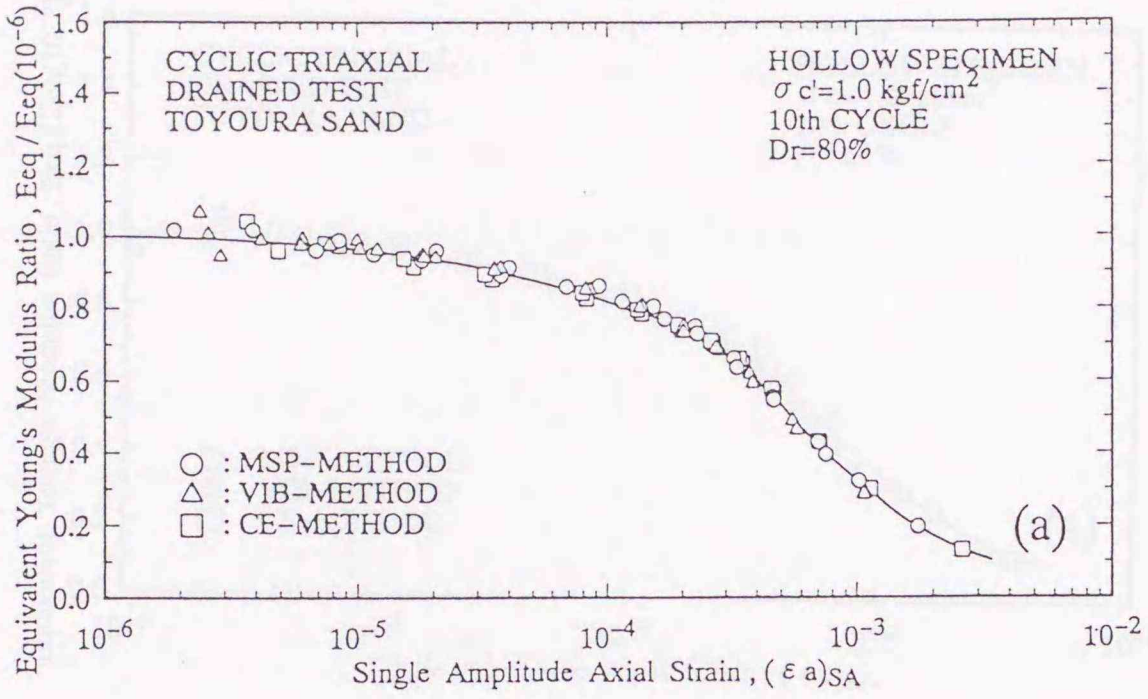


図 4 － 5　三軸試験における間隙水圧発生特性に及ぼす供試体作製方法の影響
(a)Ｄｒ＝８０％　(b)Ｄｒ＝６０％



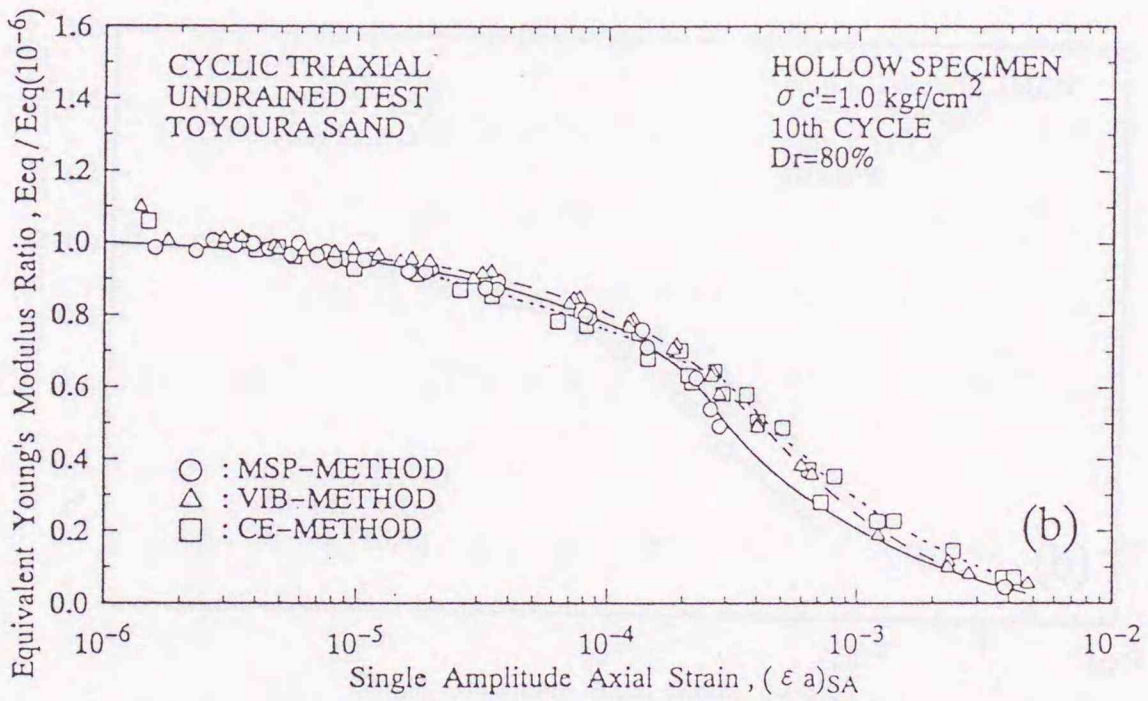
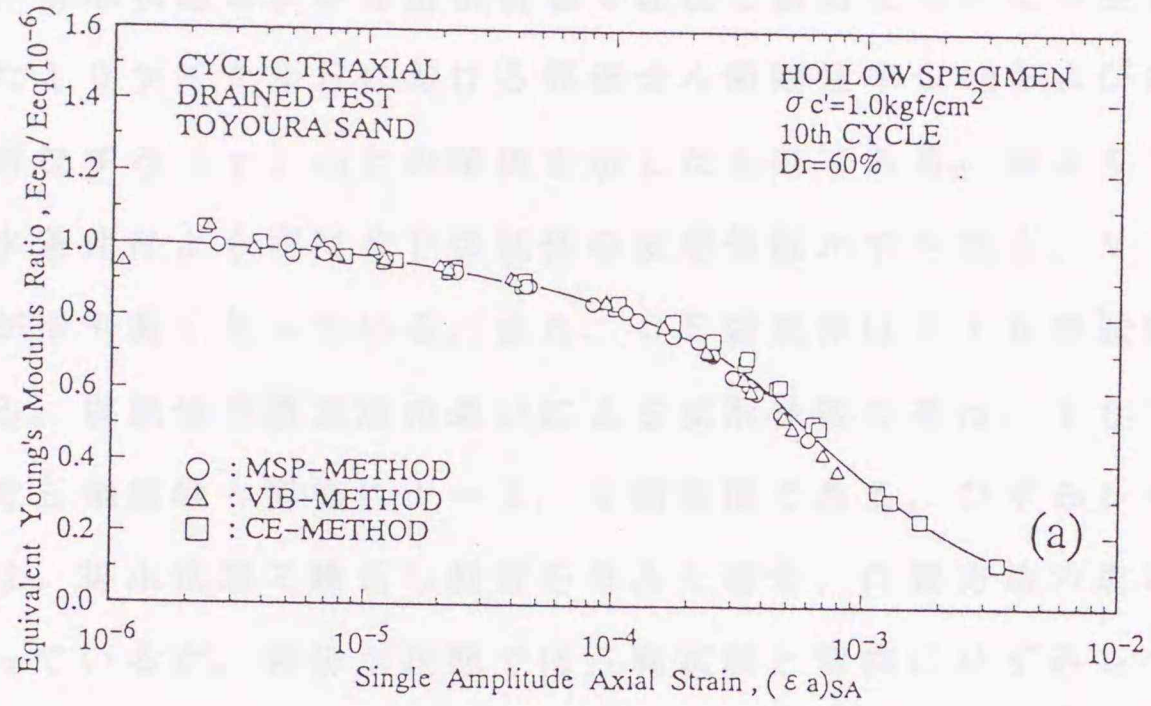


図４－６　正規化したＥeqと（ε a）$_{SA}$との関係
（三軸試験，Ｄｒ＝８０％）(a)排水載荷　(b)非排水載荷



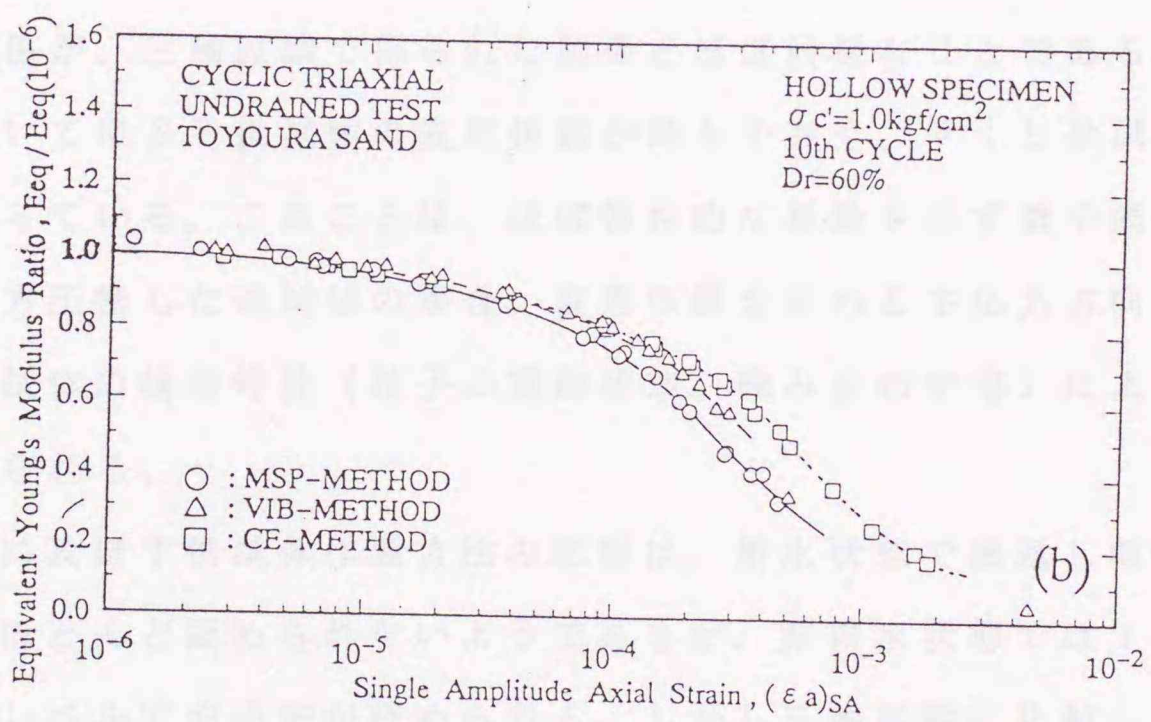


図４－７　正規化したＥeqと（ε a）$_{SA}$との関係
（三軸試験，Ｄｒ＝６０％）(a)排水載荷　(b)非排水載荷

４．２．２　中空ねじり試験

図４－８，９は、三軸試験と同様にＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法で作製した豊浦砂供試体に、排水状態および非排水状態で繰返し載荷を与えた中空ねじり試験から得られた１０サイクル目における等価せん断剛性率Ｇeqおよび減衰比ｈと片振幅せん断ひずみ（γ）$_{SA}$との関係を示したものである。図より三軸試験と同様に、排水条件によらずＭＳＰ供試体の変形係数がやや低く、ＶＩＢ供試体の変形係数がやや高くなっている。また、ＣＥ供試体はＶＩＢ供試体に近い値となっている。供試体作製方法の違いによる変形係数の差は、１０$^{-6}$程度のひずみレベルで三軸試験と同様に１～１．５割程度である。ひずみレベルが大きなところでは、排水状態で繰返し載荷を与えた場合、作製方法の違いによる差は小さくなっているが、非排水状態では三軸試験と同様にひずみレベルが大きくなっても作製方法によって差はなくならない。ただしその差は三軸試験よりも小さい。

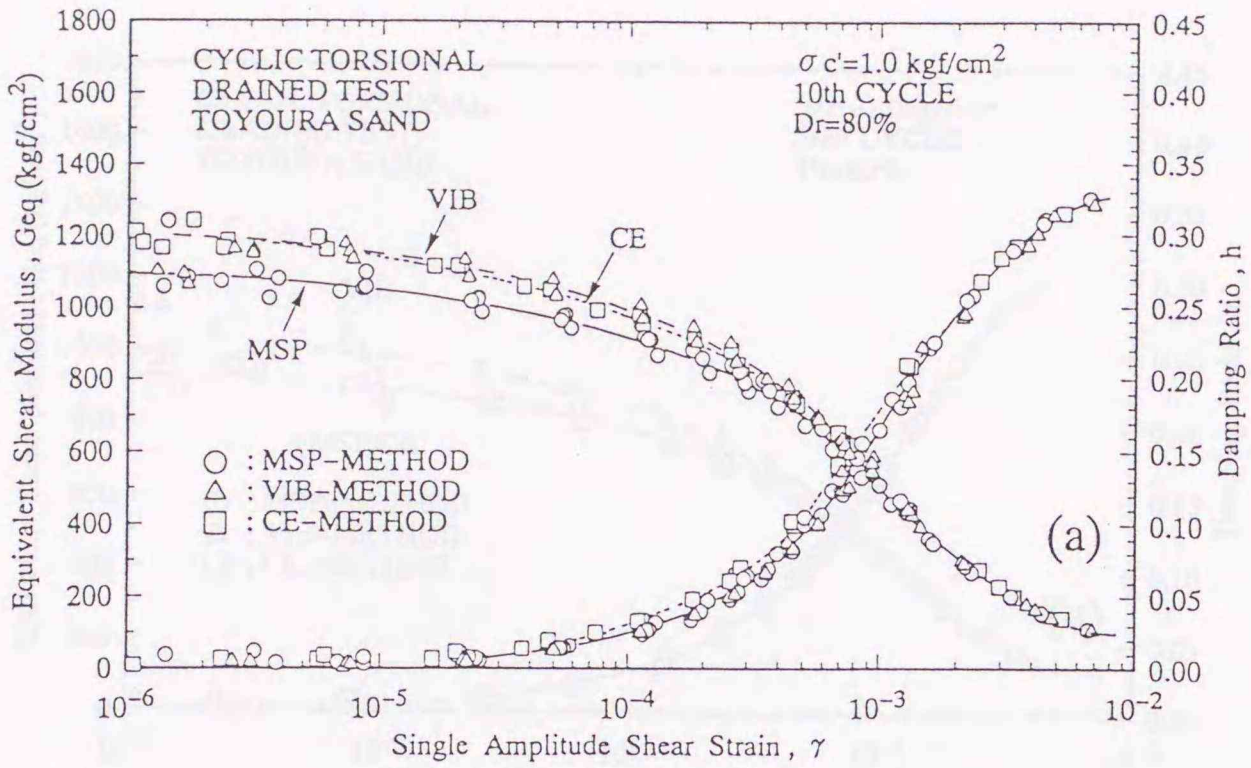
ここで、注目されることは供試体作製方法による微小ひずみレベルの変形係数の大小関係が、三軸試験で得られた関係とほぼ同様なことである。すなわち、両試験においてＭＳＰ供試体の変形係数が最も小さく、ＶＩＢ供試体の変形係数が高くなっている。このことは、ほぼ弾性的な挙動を示す微小領域での変形係数は、等方圧密した供試体の場合、変形係数を求める主応力方向には依存せず、その供試体の構造特性（粒子の接触状態、噛み合わせ等）によって決まるものと考えられる。

一方、ｈに及ぼす供試体作製方法の影響は、排水状態で繰返し載荷を与えた場合には、ほとんど認められないようであるが、非排水状態では１０$^{-3}$程度以上のひずみレベルでやや差が認められる。しかし三軸試験に比較して供試体作製方法の相違による差は小さい。

このように、非排水状態で繰返し載荷を与えた場合、ひずみが大きいところでＧeqおよびｈに供試体作製方法によって差が認められたのは、三軸試験と同様に、繰返し載荷にともなう間隙水圧の発生量が作製方法によって異なるためである。ただし、三軸試験よりもその差が小さかったのは、図４－10に示すように、供試体作製方法の相違による間隙水圧の発生量の相違は、三軸試験よりも小さいため、作製方法の差が顕著に認められなかったものと言える。

図４－11，12にはＧeqを１０$^{-6}$におけるＧeqで正規化した場合について示しているが、三軸試験と同様に排水状態で繰返し載荷を与えた場合には、供試体作製方法の影響はほとんど認められないが、非排水状態ではひずみレベルの大きなところでやや差が生じている。

以上のように、供試体作製方法が変形定数に及ぼす影響は中空ねじり試験においても認められた。また作製方法による変形係数の大小関係は、三軸試験と中空ねじり試験においてほぼ同じ関係となっており、変形係数は作製方法の影響を受けるものの、繰返し載荷時の主応力の方向の相違によって異なることはないと言える。



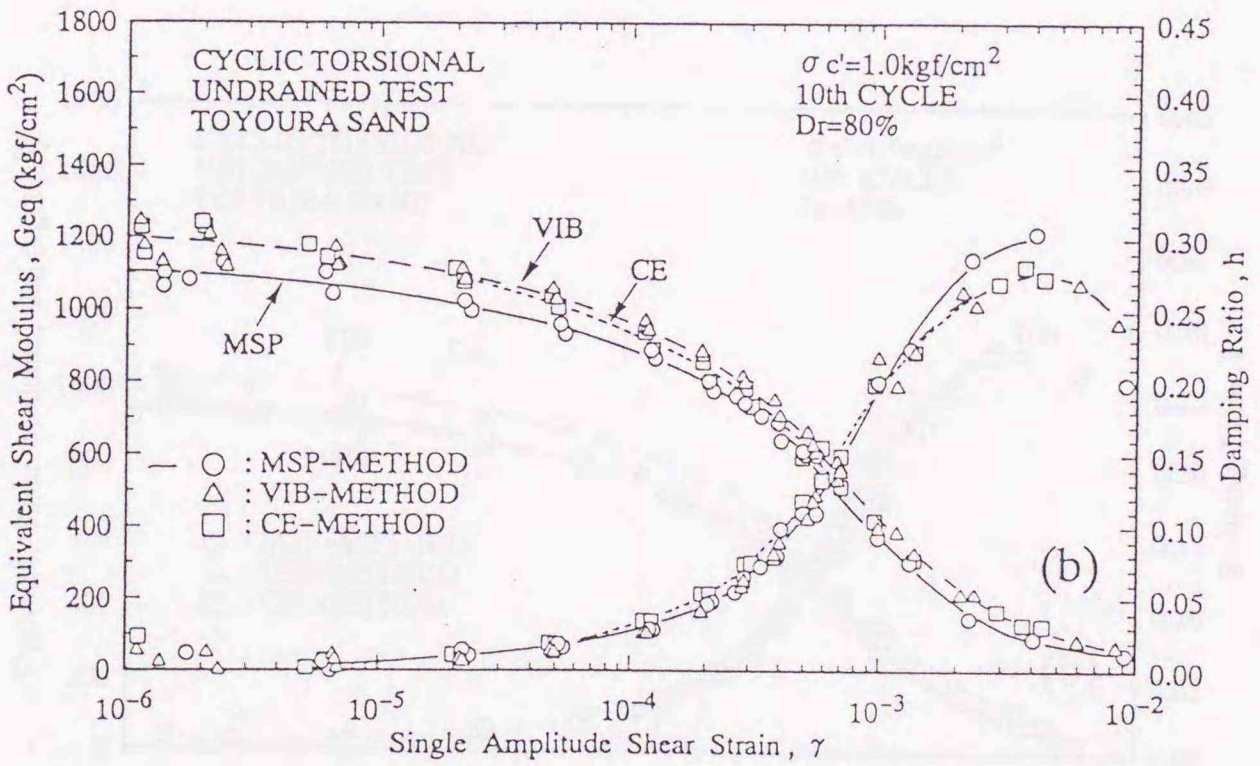
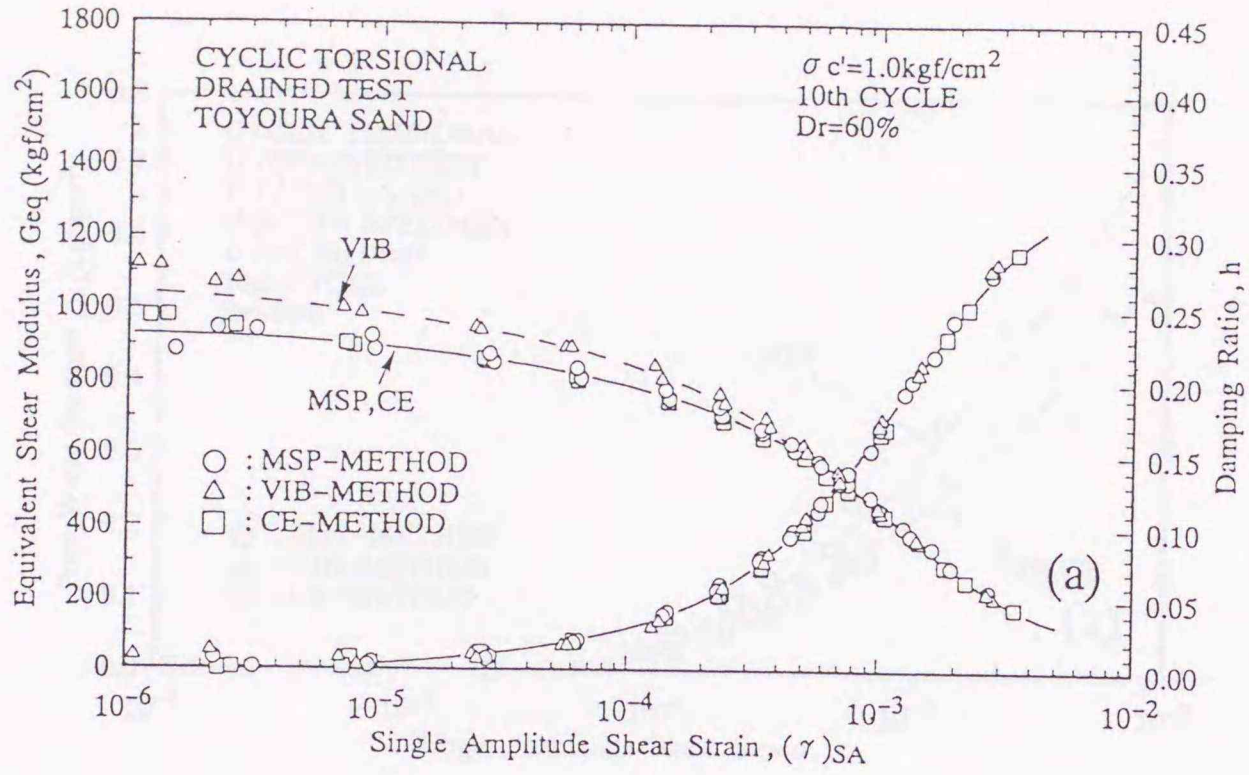


図４－８　供試体作製方法がＧeqおよびｈに及ぼす影響
（中空ねじり試験，Ｄｒ＝８０％）(a)排水載荷　(b)非排水載荷



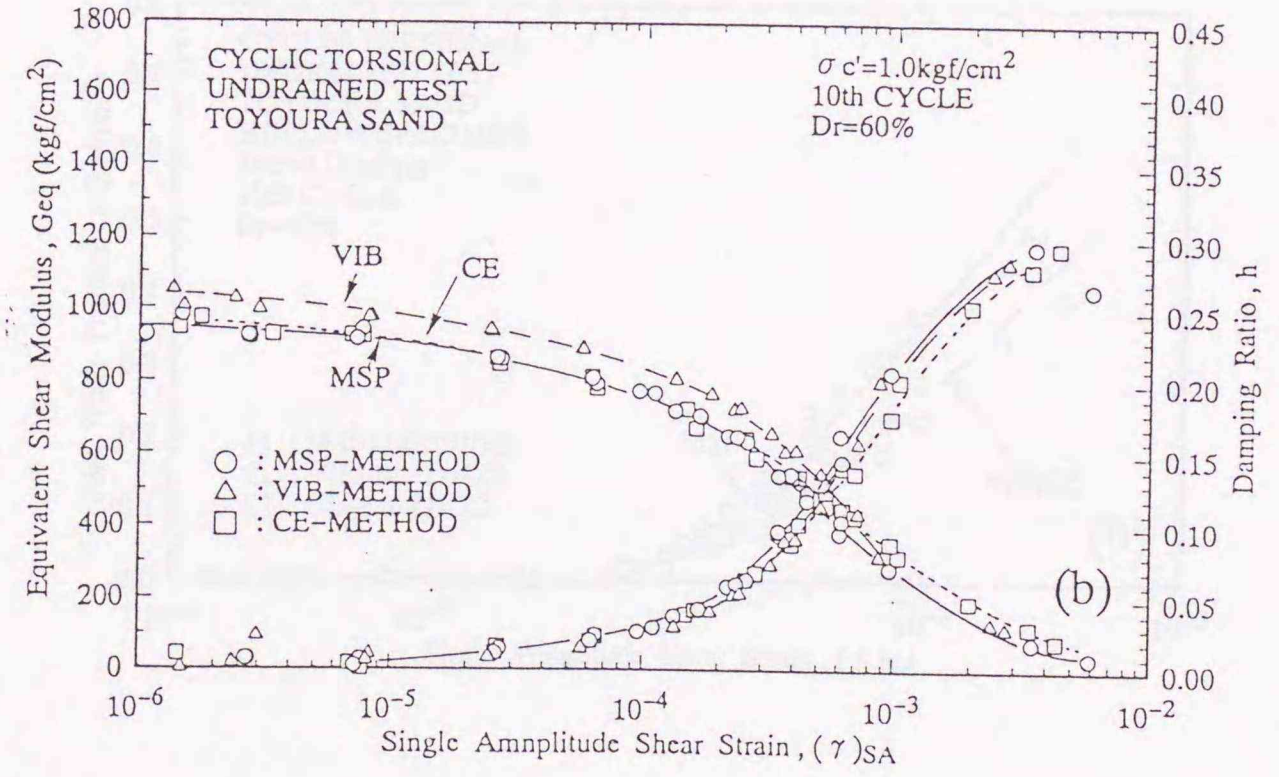
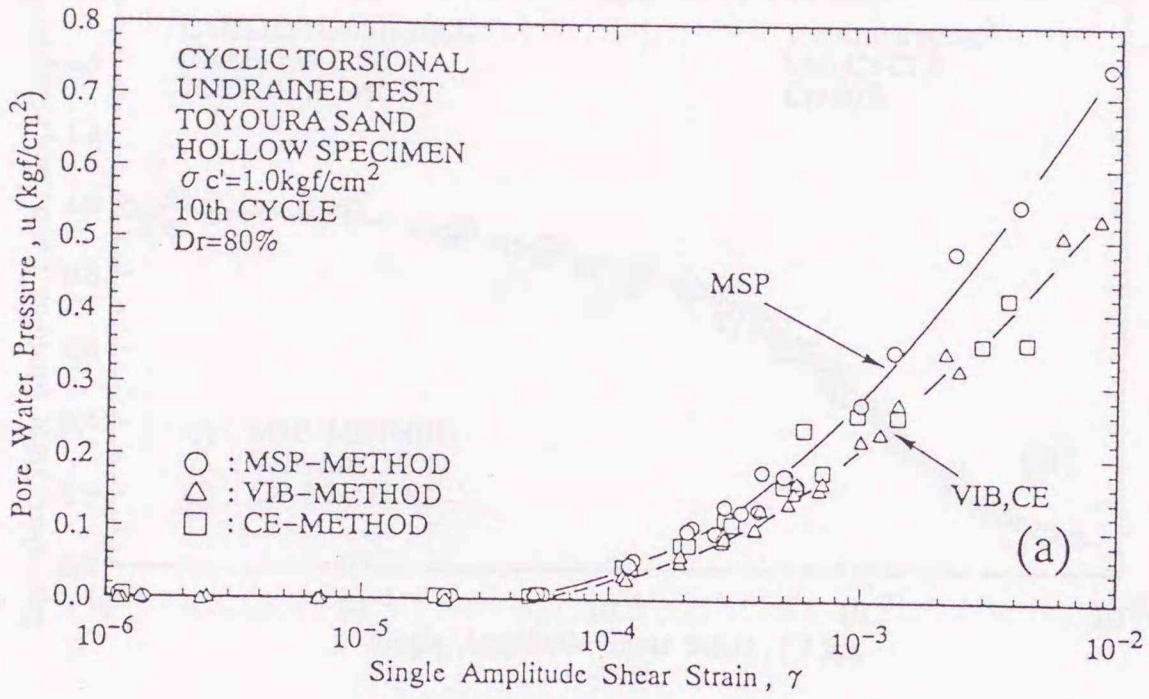


図４－９　供試体作製方法がＧeqおよびｈに及ぼす影響
（中空ねじり試験，Ｄｒ＝６０％）(a)排水載荷　(b)非排水載荷



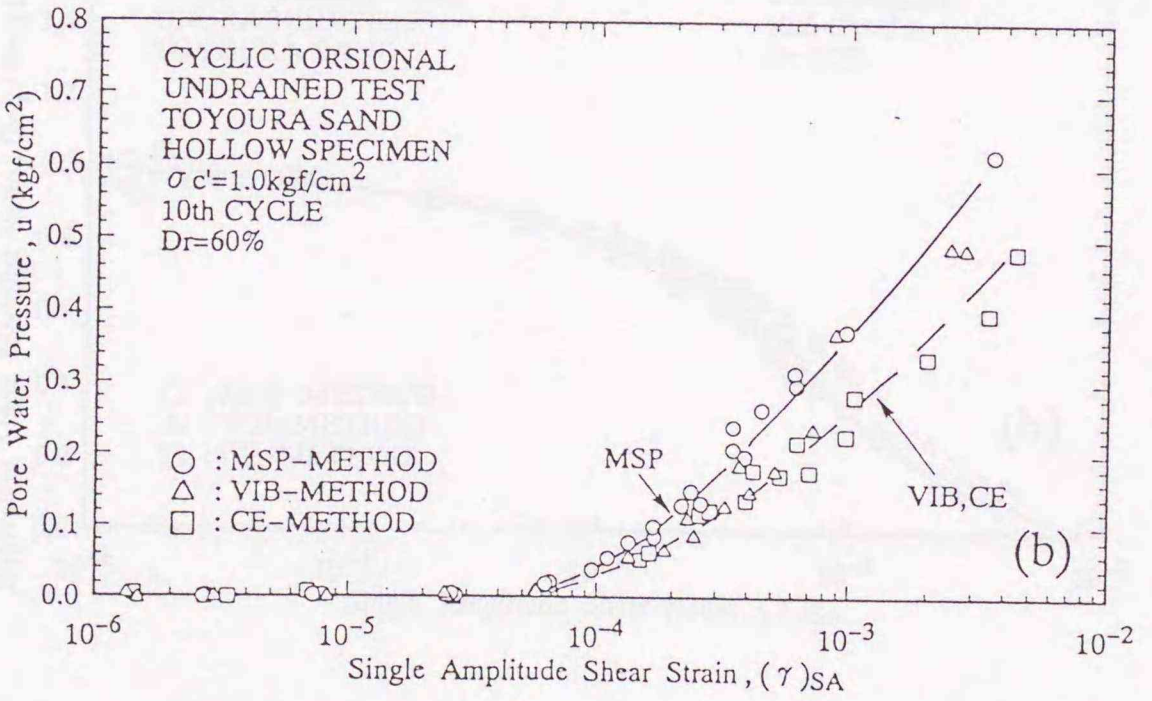
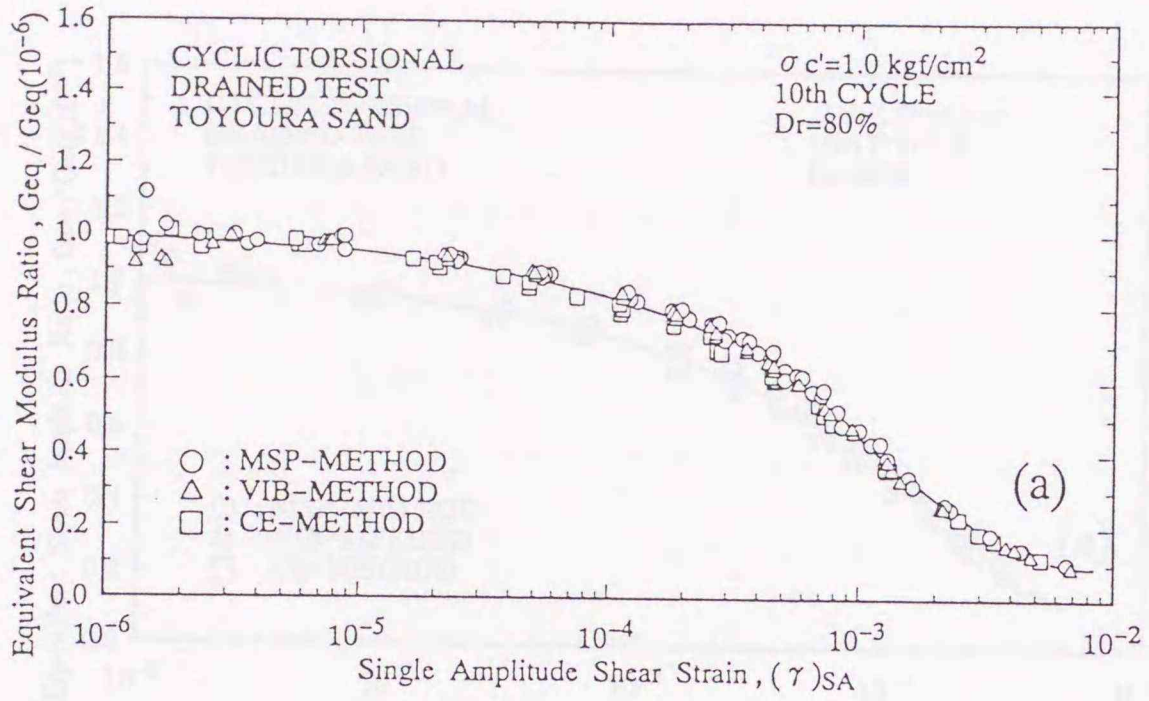


図 4 － 10　中空ねじり試験における間隙水圧発生特性に及ぼす
供試体作製方法の影響　(a)Ｄｒ＝８０％　(b)Ｄｒ＝６０％



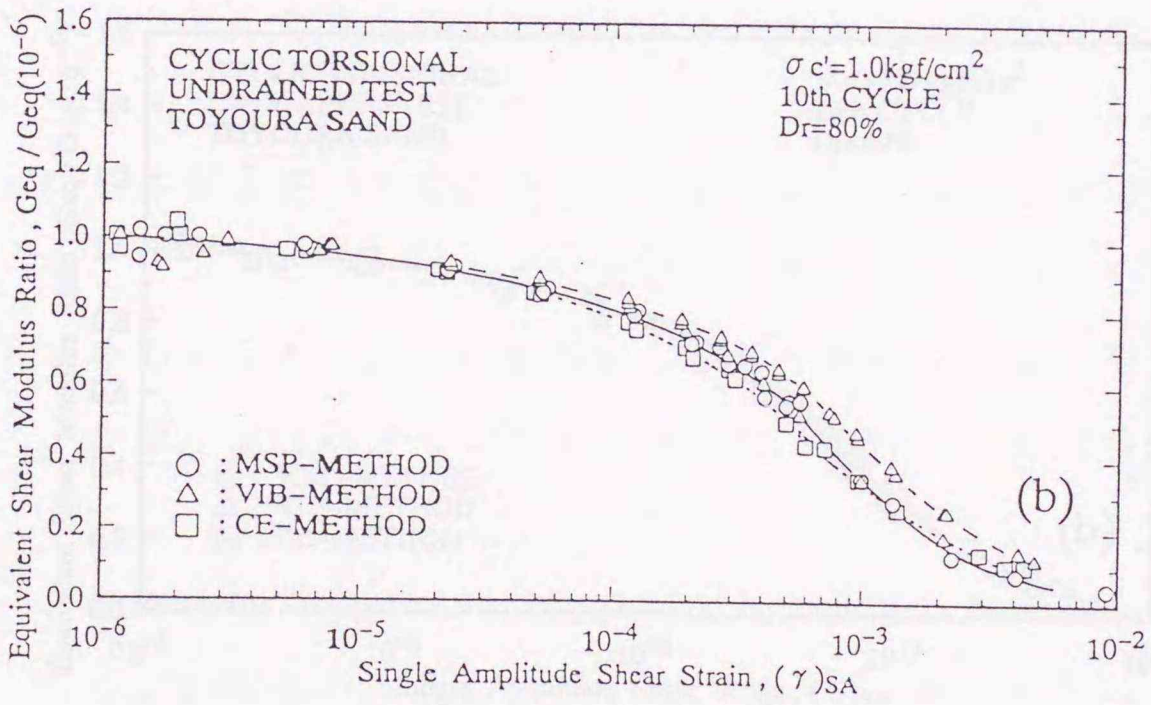
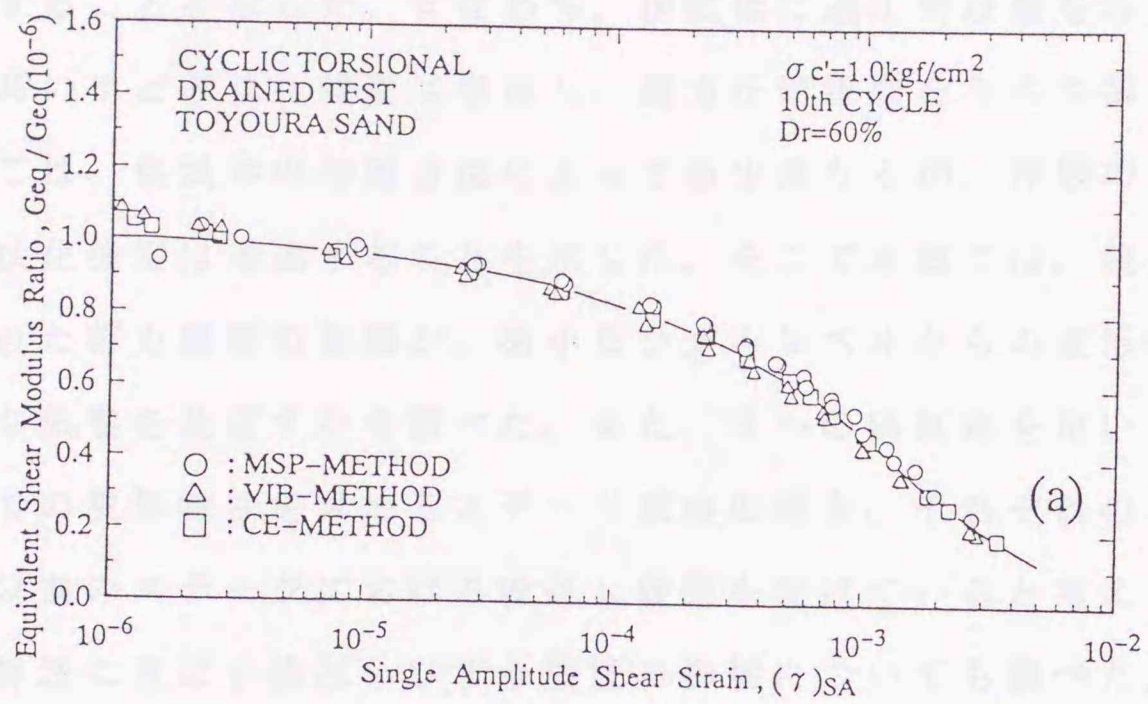


図４－11　正規化したＧeqと（γ）$_{SA}$との関係
（中空ねじり試験，Ｄｒ＝８０％）(a)排水載荷　(b)非排水載荷



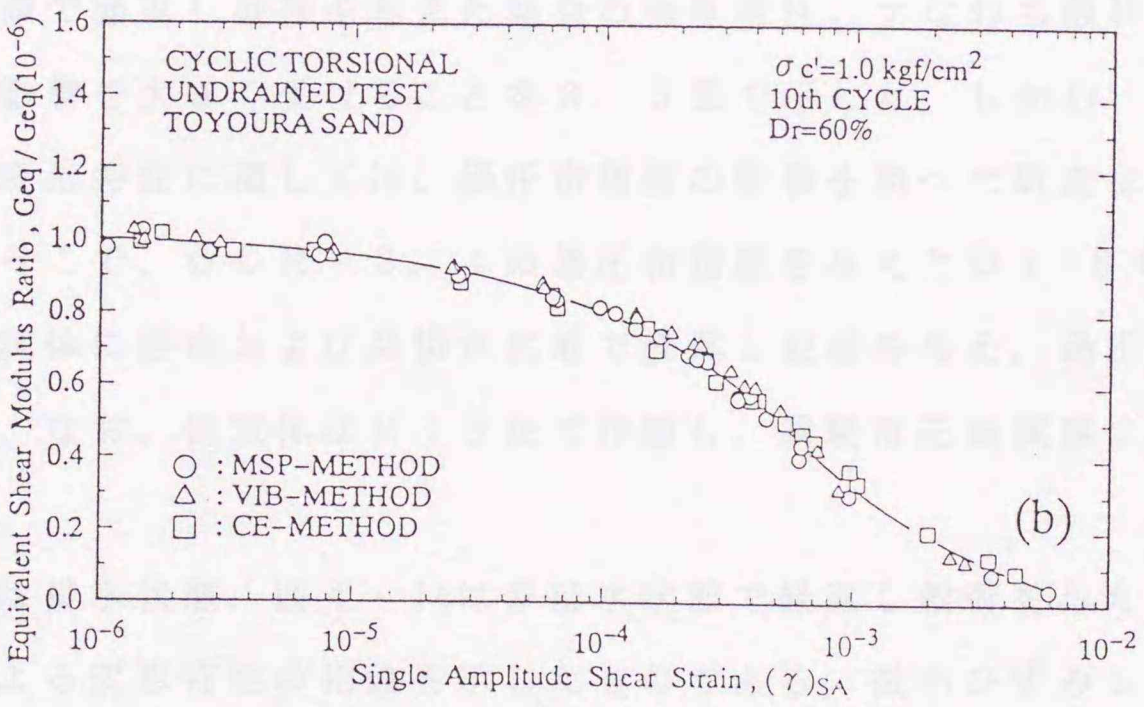


図４－12　正規化したＧeqと（γ）$_{SA}$との関係
（中空ねじり試験，Ｄｒ＝６０％）（a)排水載荷　（b)非排水載荷

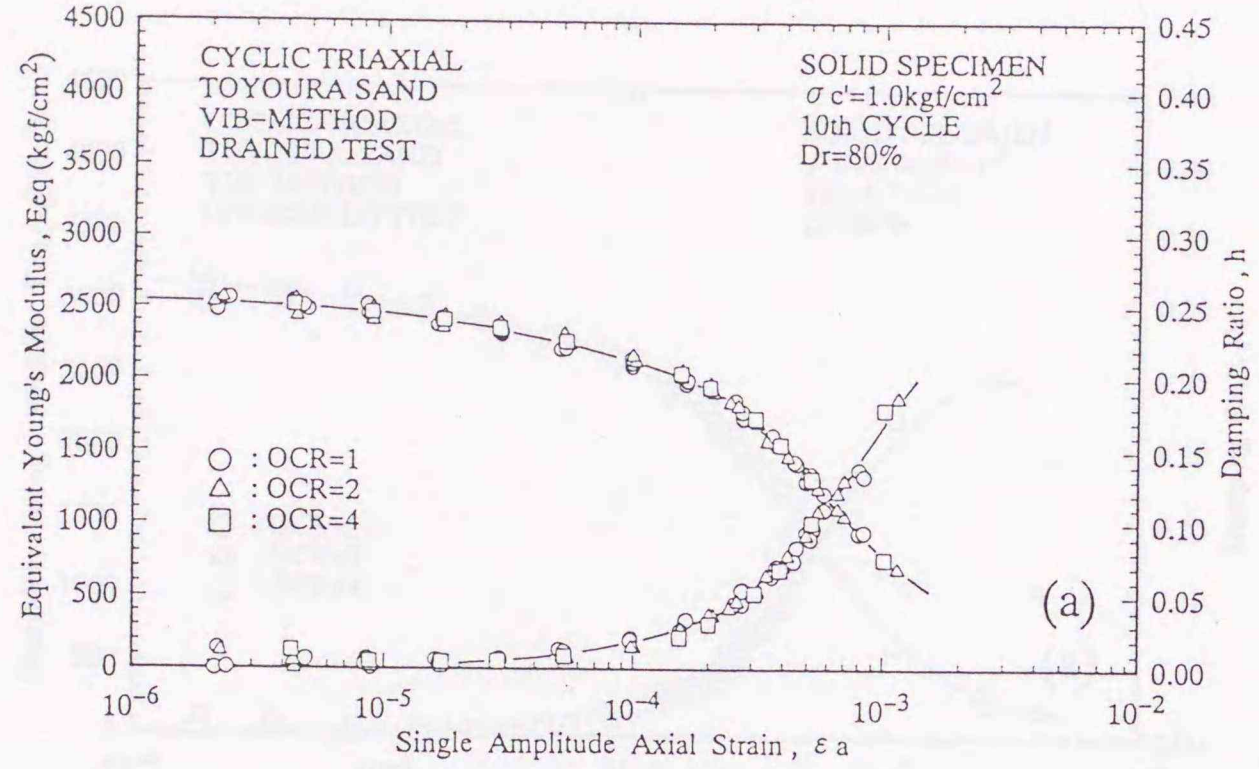
４．３　応力履歴の影響

第３章で、供試体に過圧密履歴や異方圧密履歴を与えると、その後の液状化特性は変化することを示した。すなわち、供試体に過圧密履歴を与えた場合は、過圧密比が高いほど液状化強度は増加し、異方圧密履歴を与えた場合は、三軸試験においては、供試体の作製方法によって多少異なるが、伸張の応力履歴を与えると液状化強度は増加することを示した。そこで本節では、液状化強度特性に認められた応力履歴の影響が、微小なひずみレベルからの変形特性に対してどのような影響を及ぼすかを調べた。また、１つの供試体を用いて広範なひずみレベルでの変形特性を求めるステージ試験の場合、それぞれのひずみレベルにおいて以前のステージにおける繰返し履歴を受けていると考えられる。そこで、変形特性に及ぼす繰返しひずみ履歴の影響についても調べた。

４．３．１　過圧密履歴の影響

非排水状態で繰返し載荷を与えた場合の強度特性、すなわち液状化強度は過圧密履歴の影響を大きく受けることを３．３節で示した。しかし、微小ひずみレベルでの変形特性に関しては、過圧密履歴の影響を調べた研究はほとんど見られない。そこで、ＯＣＲ＝２，４の過圧密履歴を与えたＤｒ＝８０％，６０％の豊浦砂供試体に排水および非排水状態で繰返し載荷を与え、過圧密履歴の影響を調べた。なお、供試体はＶＩＢ法で作製し、試験は三軸試験によって行った。

図４－13は排水状態、図４－14は非排水状態で繰返し載荷を与えた場合の過圧密履歴による変形特性の相違を示したものである。微小ひずみレベルではほとんど過圧密履歴の影響は認められない。ただし、ひずみレベルが大きくなると、非排水状態で繰返し載荷を与えた場合、過圧密比が高いほどややＥeqが高く、ｈが低くなっている。これは、非排水状態で繰返し載荷を行った場合、過圧密比が高いほど図４－15に示すように間隙水圧の発生量が低くなるため有効応力が過圧密比によって同じひずみレベルで異なり、Ｅeqおよびｈに差が生じたものと考えられる。しかし、全体的にみると過圧密履歴が変形特性に及ぼす影響は豊浦砂においてはほとんど認められない言える。



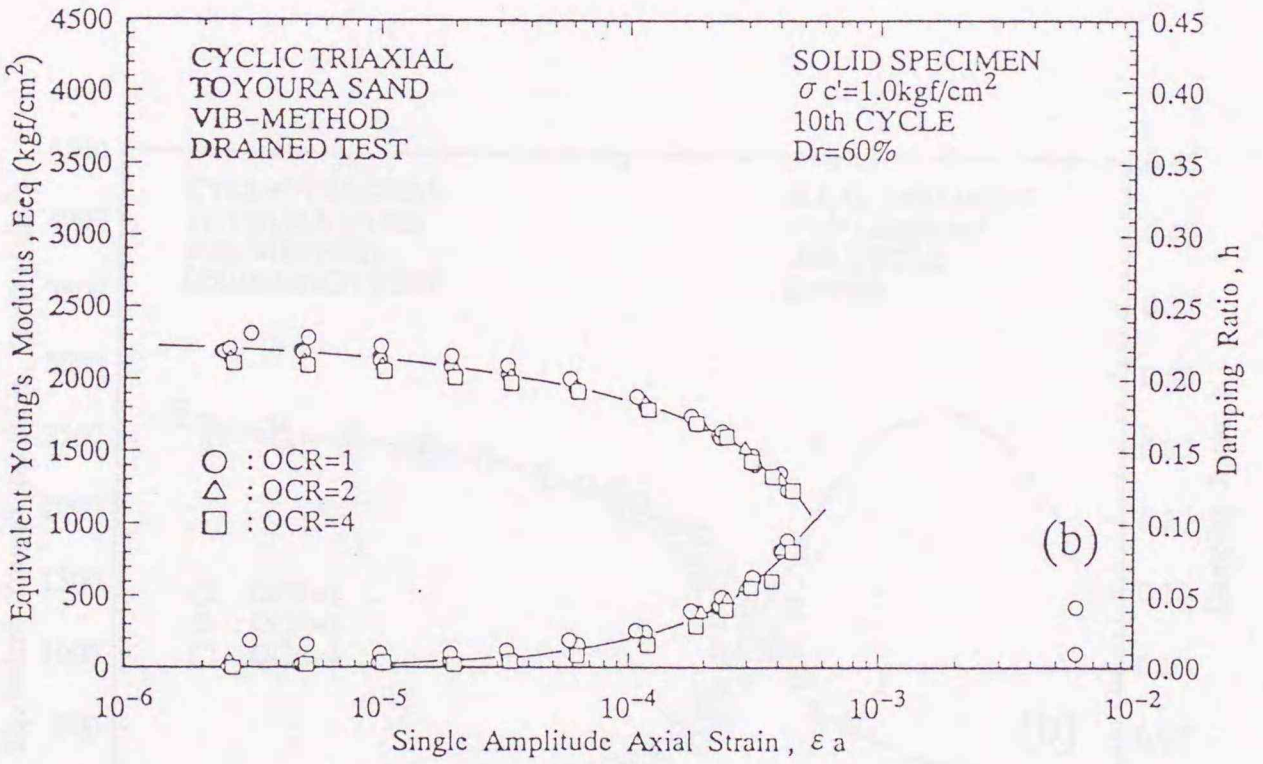
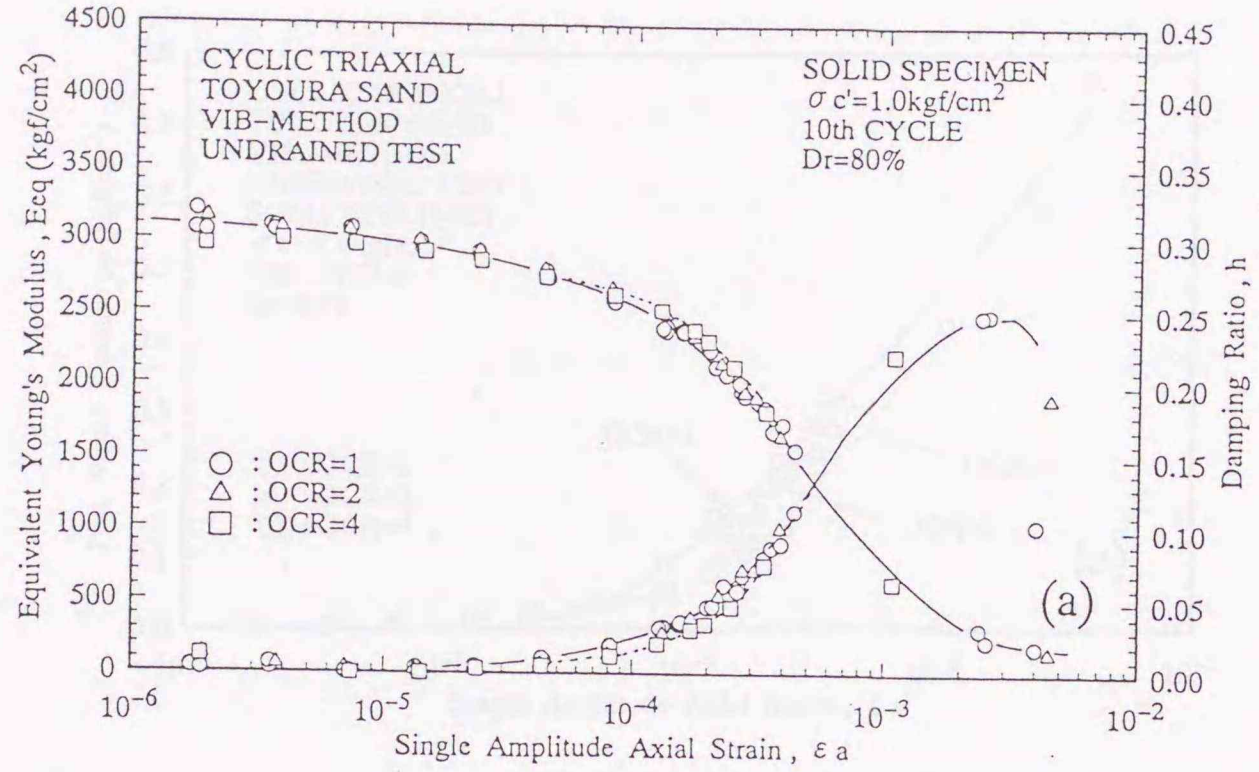


図４－13　過圧密履歴の影響（三軸試験・排水載荷）
（a）Ｄｒ＝８０％　（b）Ｄｒ＝６０％



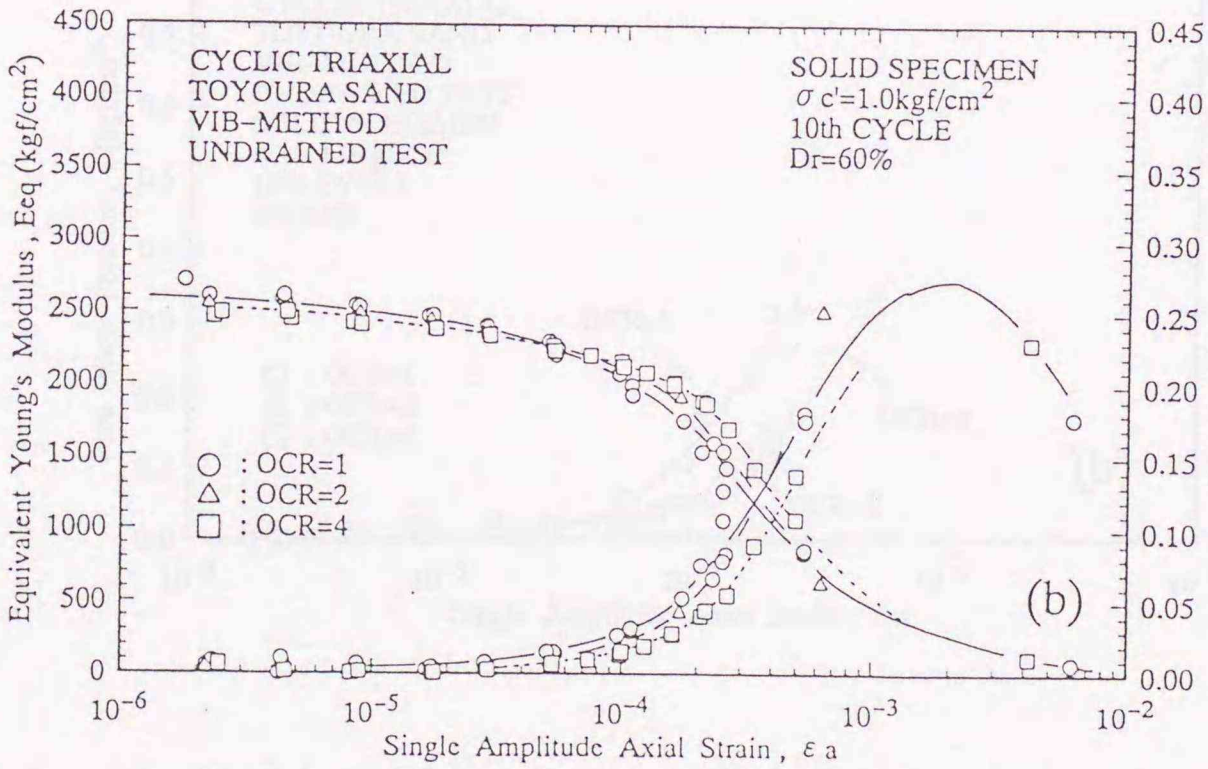
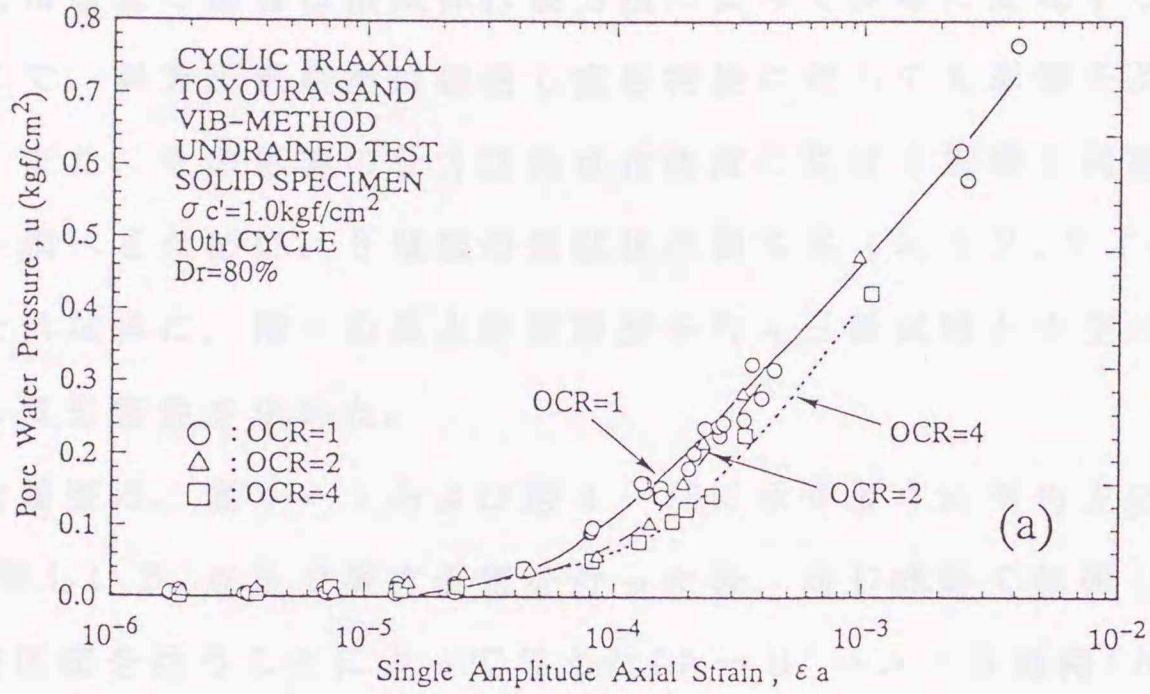


図４－14　過圧密履歴の影響（三軸試験・非排水載荷）
（a）Ｄｒ＝８０％　（b）Ｄｒ＝６０％



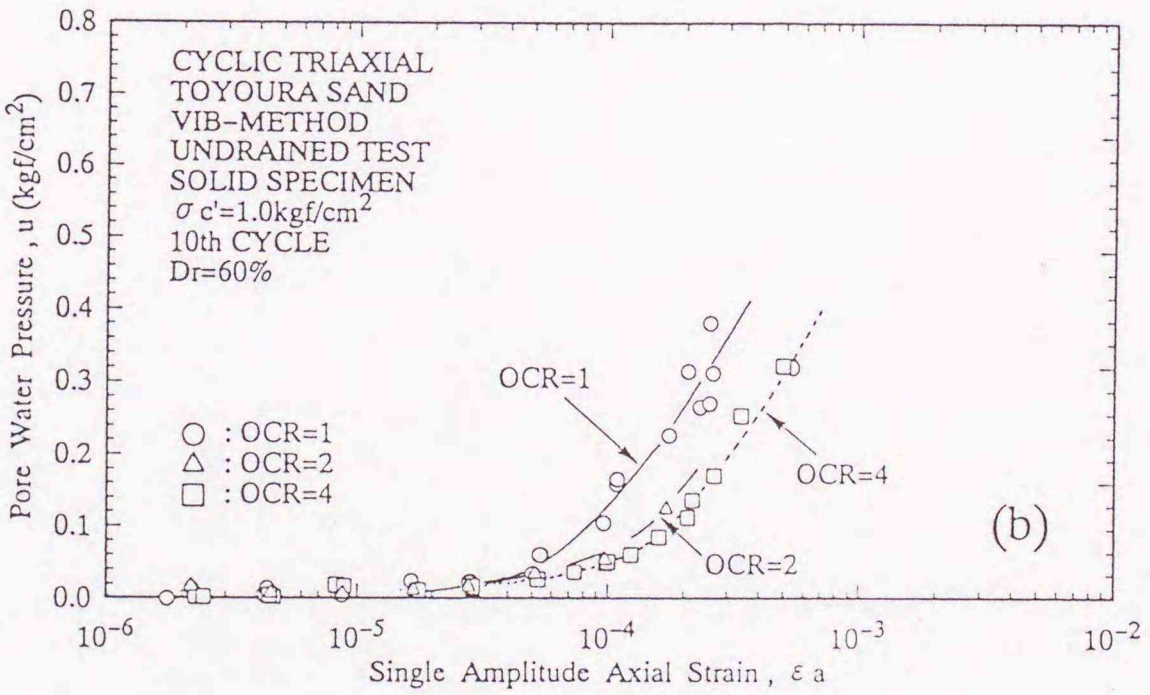


図４－15　繰返し載荷１０サイクル終了時に残留している間隙水圧
（a）Ｄｒ＝８０％　（b）Ｄｒ＝６０％

４．３．２　異方圧密履歴の影響

３．４節で、種々の方法で作製した供試体に対して異方圧密履歴を与え、三軸試験および中空ねじり試験による液状化強度に及ぼす影響を調べた。その結果、異方圧密履歴の影響は供試体作製方法によって多様に変化することが示された。そこで、異方圧密履歴は繰返し変形特性に対しても影響を及ぼすものであるのか、また、その影響の仕方は液状化強度に及ぼす影響と同様な形で現れるものかを調べるために、３種類の供試体作製方法（ＭＳＰ，ＶＩＢ，ＣＥ法）で作製した供試体に、種々の異方圧密履歴を与え三軸試験と中空ねじり試験により繰返し変形特性を求めた。

異方圧密履歴は、表４－１および図４－16に示すように平均主応力が１．０kgf/cm²に等しいＢ’点まで異方圧密を行った後、同じ経路で除荷し、その後Ｂ点まで等方圧密を行うことによって与えた（Ａ→Ｂ’→Ａ→Ｂ経路（Ｋ一定経路））。なお、応力履歴を与える経路を変えた場合、変形特性がどのように変化するかも調べるためにＡ→Ｂ→Ｂ’→Ｂ経路（ｐ一定経路）で応力履歴を与える試験も一部実施している。

表4－1　圧密方法

試験ケース	載荷方法	作製方法	圧密経路	圧密時の最大主応力比 K
三軸試験	排水載荷	ＶＩＢ	K一定経路	0.4, 0.5, 2.0, 2.5
		ＶＩＢ	p一定経路	0.3, 0.4, 0.5, 2.0, 2.5, 3.0
	非排水載荷	ＭＳＰ	K一定経路	0.5, 2.0
		ＶＩＢ		0.5, 2.0
		Ｃ　Ｅ		0.5, 2.0
ねじり試験	排水載荷	ＭＳＰ	K一定経路	0.5, 2.0
		ＶＩＢ		0.5, 2.0
		Ｃ　Ｅ		0.5, 2.0

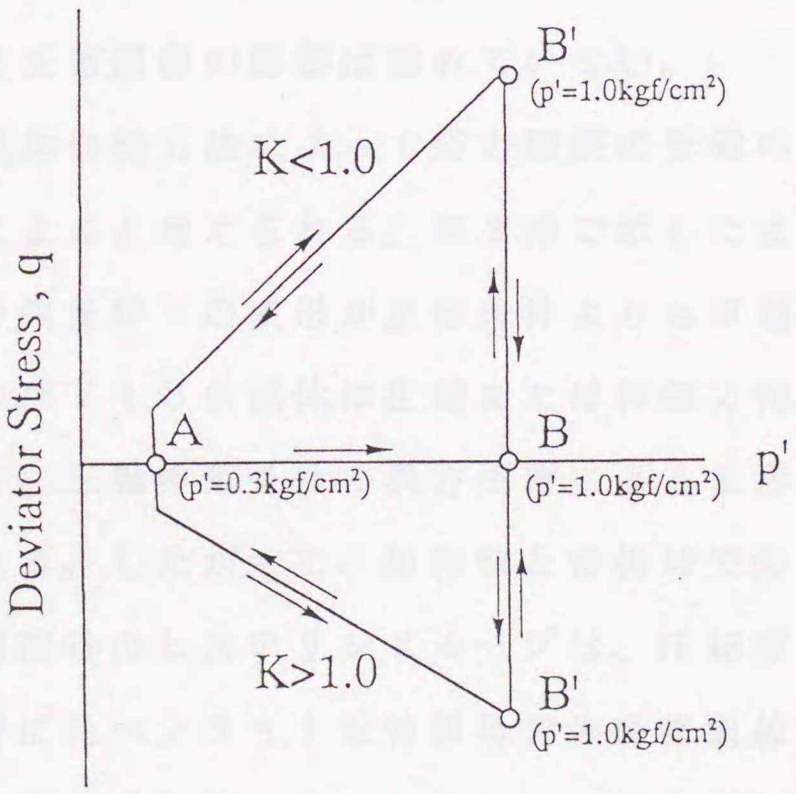


図4－16　圧密経路

１）三軸試験

図４－17は等方圧密およびＫ＝０．５，２．０の異方圧密履歴を与えたＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ供試体に対して、非排水状態で繰返し載荷を与えた三軸試験から得られた結果を示している。なお、ＭＳＰおよびＶＩＢ法では中実供試体を、ＣＥ法では中空供試体を用いている。

ＭＳＰ供試体においては、Ｋ＝２．０の伸張の圧密履歴を受けた場合、10^{-4}以下の微小ひずみレベルでＫ＝０．５，１．０の場合よりもＥeqが低くなっているが、それ以上のひずみレベルでは逆にＥeqがやや高くなっている。また、ｈは10^{-4}～10^{-3}の範囲でＫ=２．０の異方圧密履歴を与えるとややは低くなっている。

また、ＶＩＢ供試体においても、ＭＳＰ供試体と同様にＫ=２．０の伸張の圧密履歴を受けた場合、微小ひずみレベルでＫ＝０．５，１．０の場合よりもＥeqがやや低くなり、ひずみレベルが大きくなるとＥeqがやや高くなっている。また、ｈにおいてもＭＳＰ供試体ほどの差はないが10^{-4}～10^{-3}の範囲でＫ＝２．０の異方圧密履歴を与えると僅かに低くなっているようである。

一方、ＣＥ供試体では、逆にＫ=０．５の圧縮の圧密履歴を受けた場合、微小ひずみレベルでややＥeqが高くなっているが、それ以上のひずみレベルでのＥeqおよびｈには異方圧密履歴の影響は現れていない。

このように、供試体作製方法によって応力履歴の影響の現れ方が異なるのは、構造異方性の相違によると考えられる。第３章で示したようにＭＳＰおよびＶＩＢ供試体は三軸伸張条件下の変形が圧縮条件よりも卓越する供試体である。さらに、ＭＳＰおよびＶＩＢ供試体は圧縮または伸張方向に同じ主応力比の異方圧密を行った場合、三軸伸張条件の異方圧密による変形量の方が大きい供試体であると考えられる。したがって、圧縮時と伸張時での骨格曲線が異なると考えると、繰返し載荷時のヒステリシスループは、圧縮履歴よりも伸張履歴を受けた方が、圧縮時に比べフラットな伸張時での骨格曲線の形状の影響を受け、Ｅeqが低くなったと考えられる。それに対し、ＣＥ供試体はやや圧縮側での変形が卓越する供試体であるため、ＭＳＰおよびＶＩＢ供試体と逆の傾向が現れたものと考えられる。

また、ひずみレベルが大きいところで、ＭＳＰ供試体およびＶＩＢ供試体の

Ｅeqおよびｈに差が認められたのは以下のように考えられる。図４－18には、繰返し載荷10サイクル終了時での過剰間隙水圧比と（εａ）$_{SA}$との関係を異方圧密履歴を受けた各供試体に対して示している。Ｋ＝２．０の伸張履歴を受けることによって間隙水圧の発生量がＭＳＰ供試体およびＶＩＢ供試体では低くなっている。したがって、繰返し載荷を非排水状態で与えているため、有効拘束圧がＫ＝０．５の伸張履歴を受けると低くなりＥeqが高くｈは低くなったと考えられる。それに対し、ＣＥ供試体においては異方圧密履歴によって間隙水圧の発生状況がほぼ等しいため差が生じなかったと言える。ここで、異方密履歴が液状化強度に及ぼす影響と比較すると、ＭＳＰおよびＶＩＢ供試体ではＫ＝２．０の伸張履歴を受けると液状化強度は増加し、ＣＥ供試体では差が生じなかった。この傾向はひずみレベルが大きいところでのＥeqに及ぼす異方圧密履歴の影響と一致している。すなわち、間隙水圧が発生するようなひずみレベルでは、Ｅeqは供試体のダイレタンシー特性に依存するため液状化強度と同様な傾向となったと考えられる。

次に、排水状態で繰返し載荷を与えたＶＩＢ供試体について示す。図４－19はＫ一定経路またはｐ一定経路で応力履歴を与えた場合の結果を示している。図４－17(b)と同様に、両経路においてＫ＜１．０の圧縮の履歴を与えた場合、ややＥeqが増加している場合があるがそれほど顕著な差は認められない。しかし、Ｋ＞１．０の伸張の履歴を与えるとＫの増加とともにＥeqは低下している。ただし、ひずみレベルが大きくなる非排水状態で繰返し載荷を与えた図４－17と異なり、その差は無くなっている。また、ｈにはほとんど応力履歴の影響が認められない。

図４－20は応力経路の違いによる変形特性の相違をＫ＝０．４とＫ＝２．５の場合について示している。応力経路の違いによって変形特性に及ぼす応力履歴の影響に差は生じていないことが分かる。

このように、三軸試験においては供試体が異方圧密履歴を受けた場合、その後の変形特性は、供試体の作製方法によって異なることが分かる。これは、三軸圧縮条件と伸張条件での変形特性が供試体作製方法によって大きく異なるためである。また、異方圧密履歴が微小ひずみレベルでの変形特性に及ぼす影響は、液状化強度特性に認められた傾向と一致しないことが分かった。

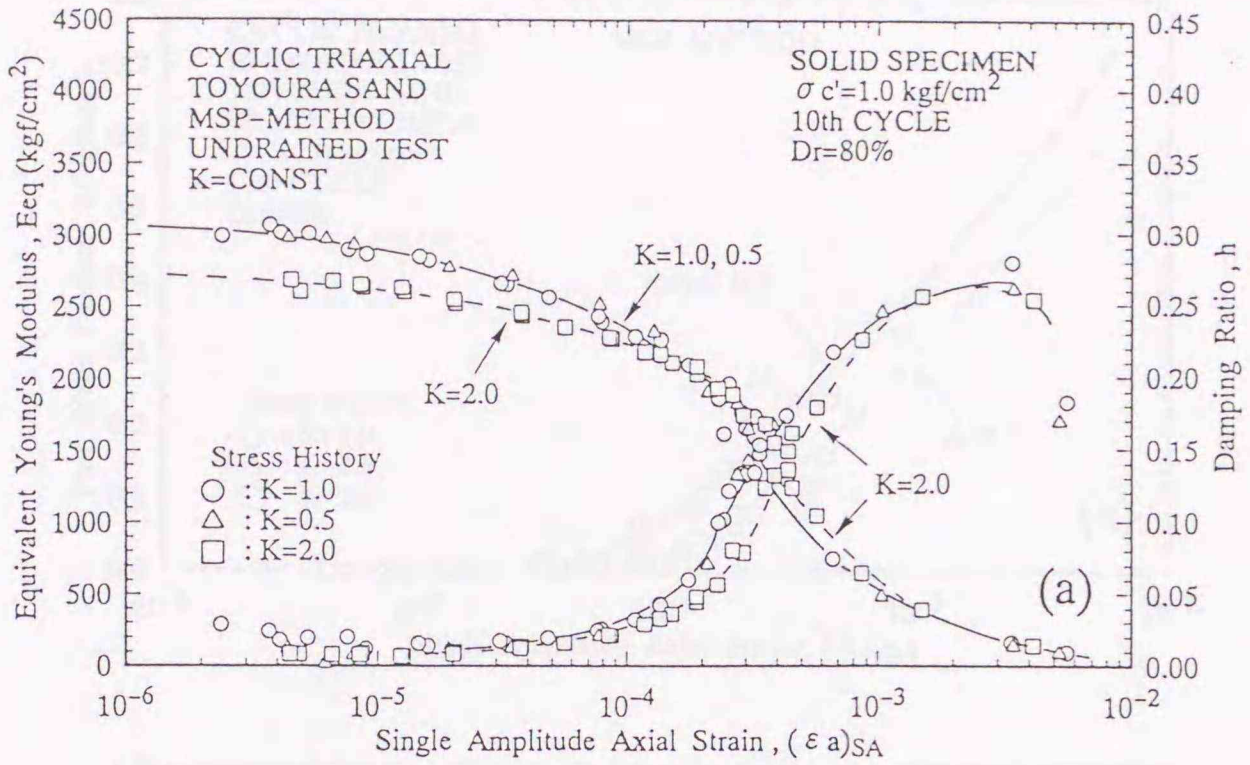
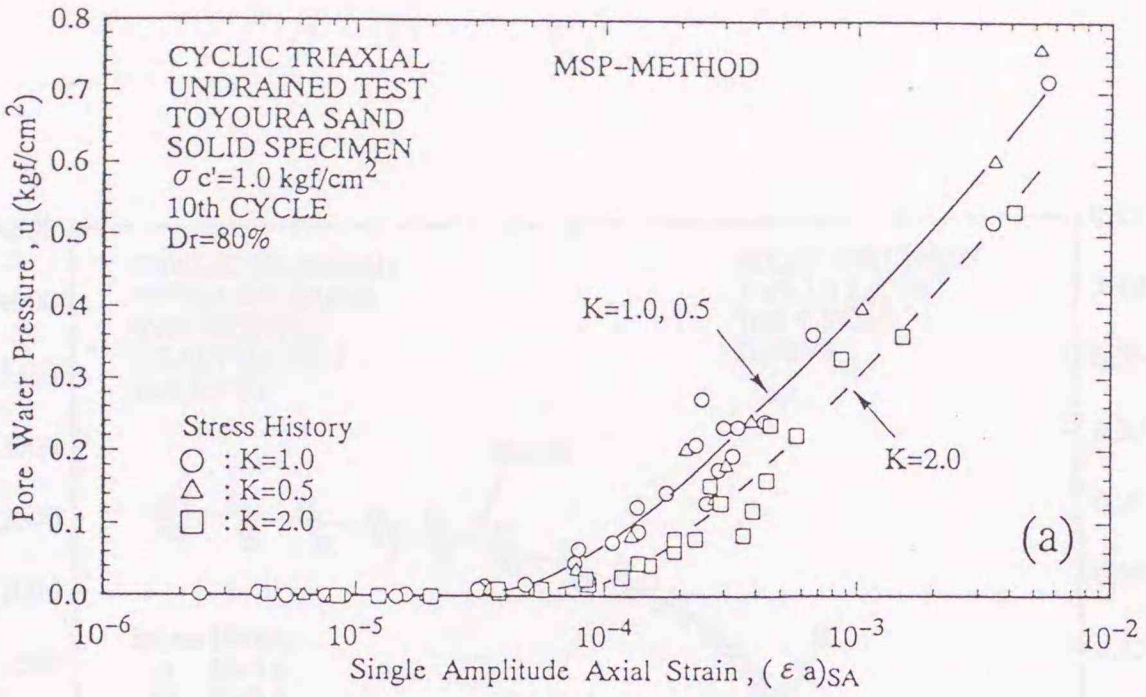
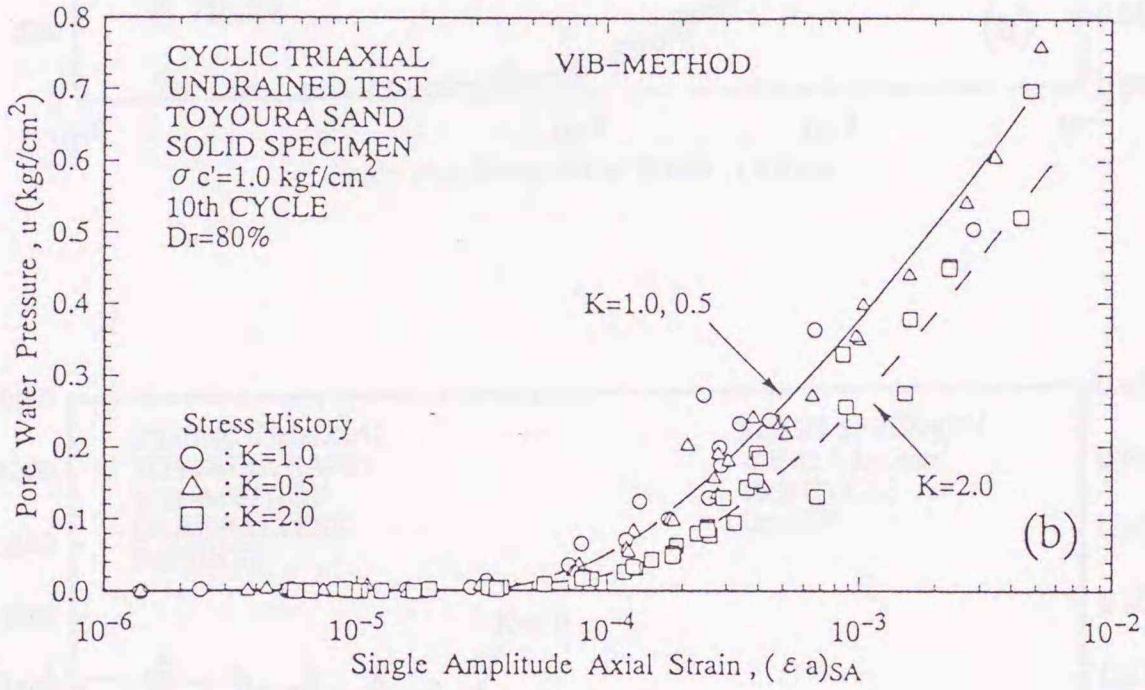


図４－17　Ｅeqおよびｈに及ぼす異方圧密履歴の影響（三軸試験・非排水載荷）
（a）ＭＳＰ供試体　（b）ＶＩＢ供試体　（c）ＣＥ供試体





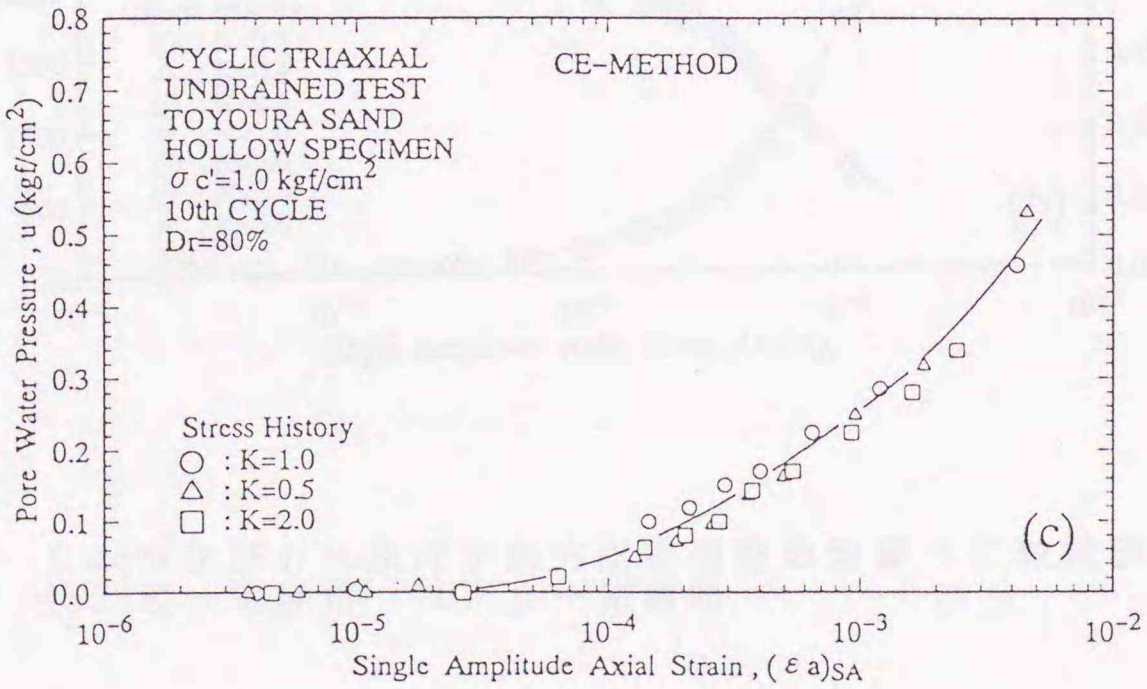
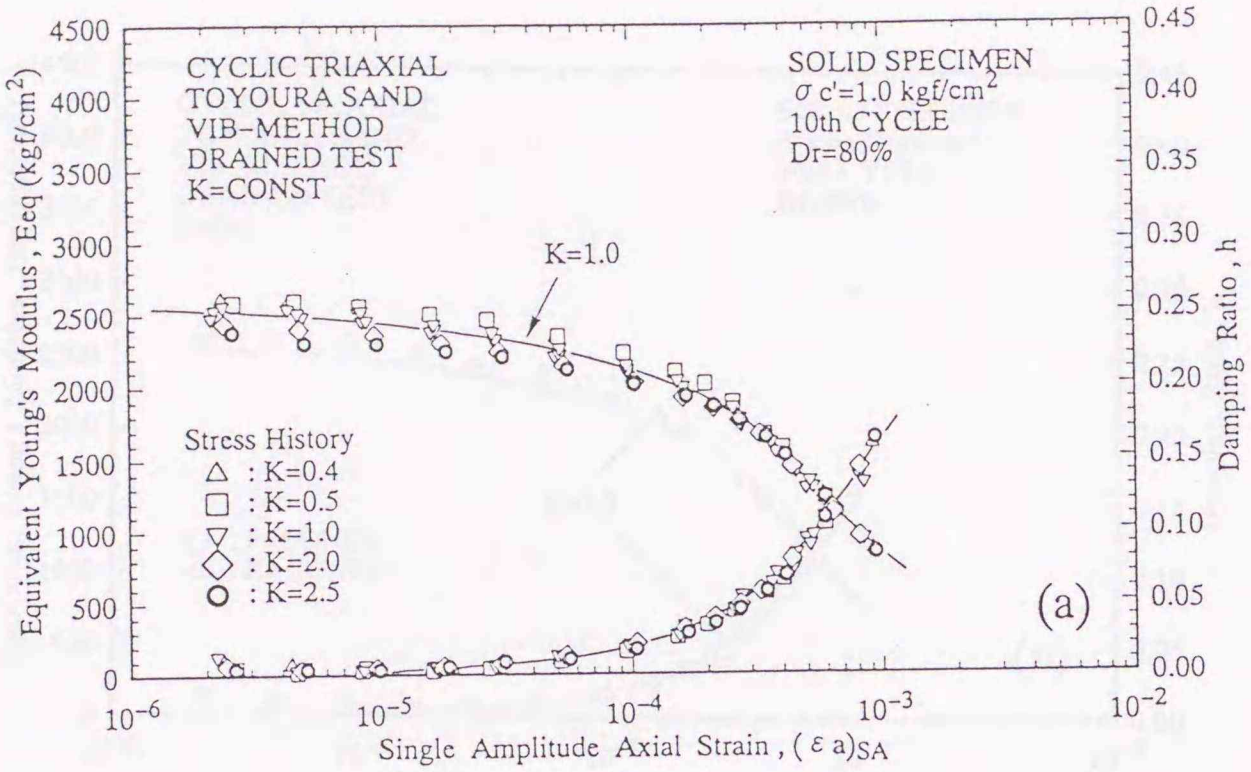


図４－18　繰返し載荷１０サイクル終了時に残留している間隙水圧
（a）ＭＳＰ供試体　（b）ＶＩＢ供試体　（c）ＣＥ供試体



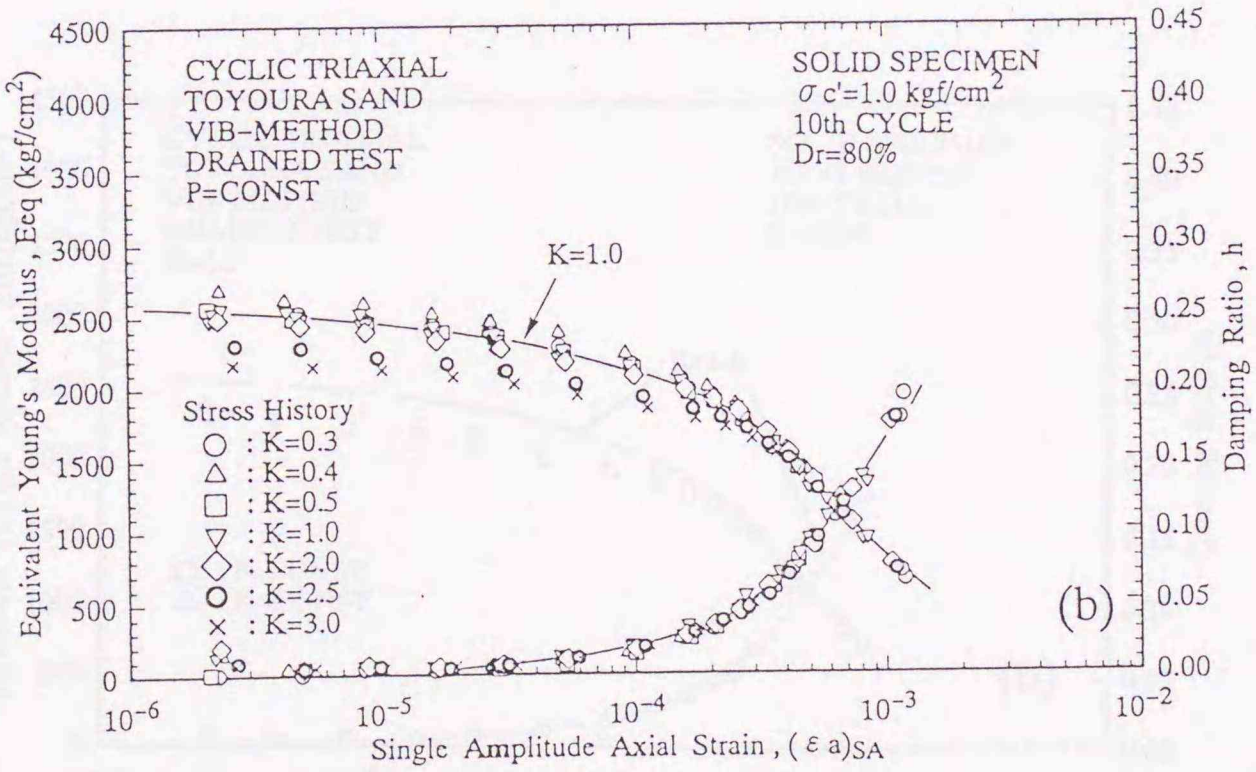
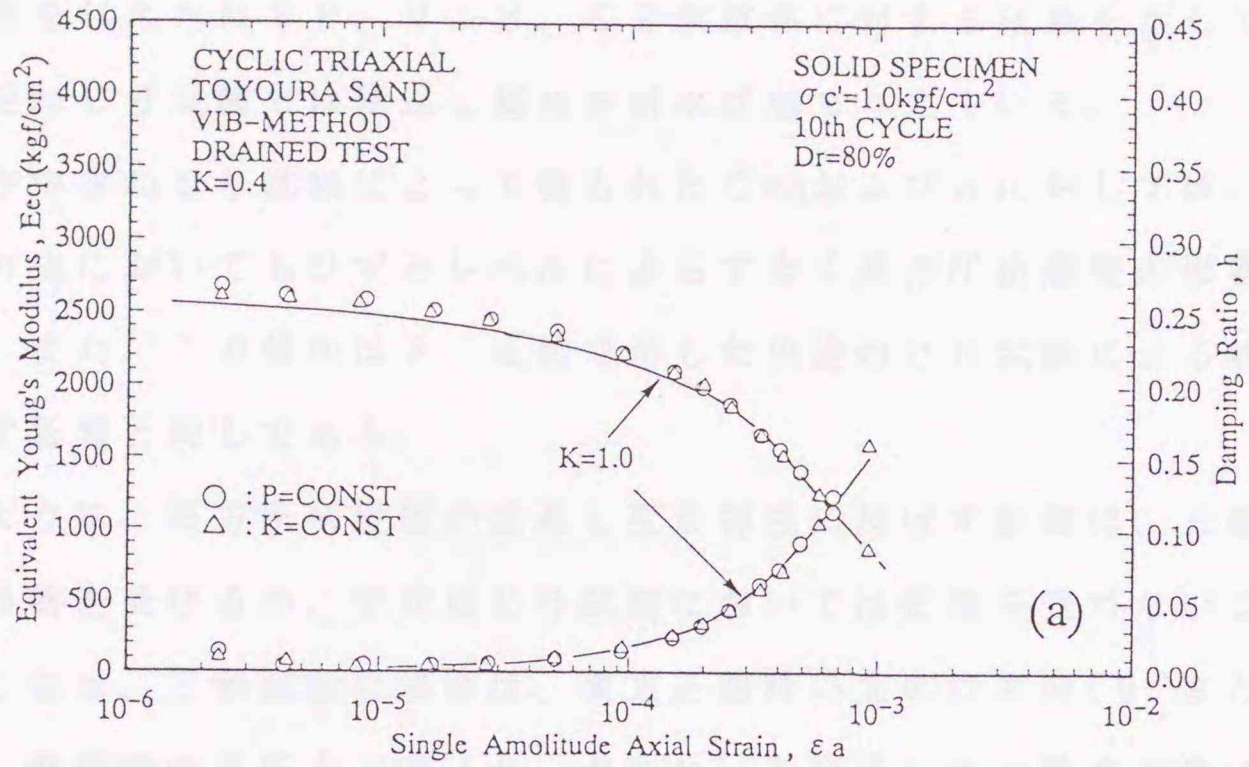


図４－19　Ｅeqおよびｈに及ぼす異方圧密履歴の影響（三軸試験・排水載荷）
（a）Ｋ一定経路　（b）ｐ一定経路



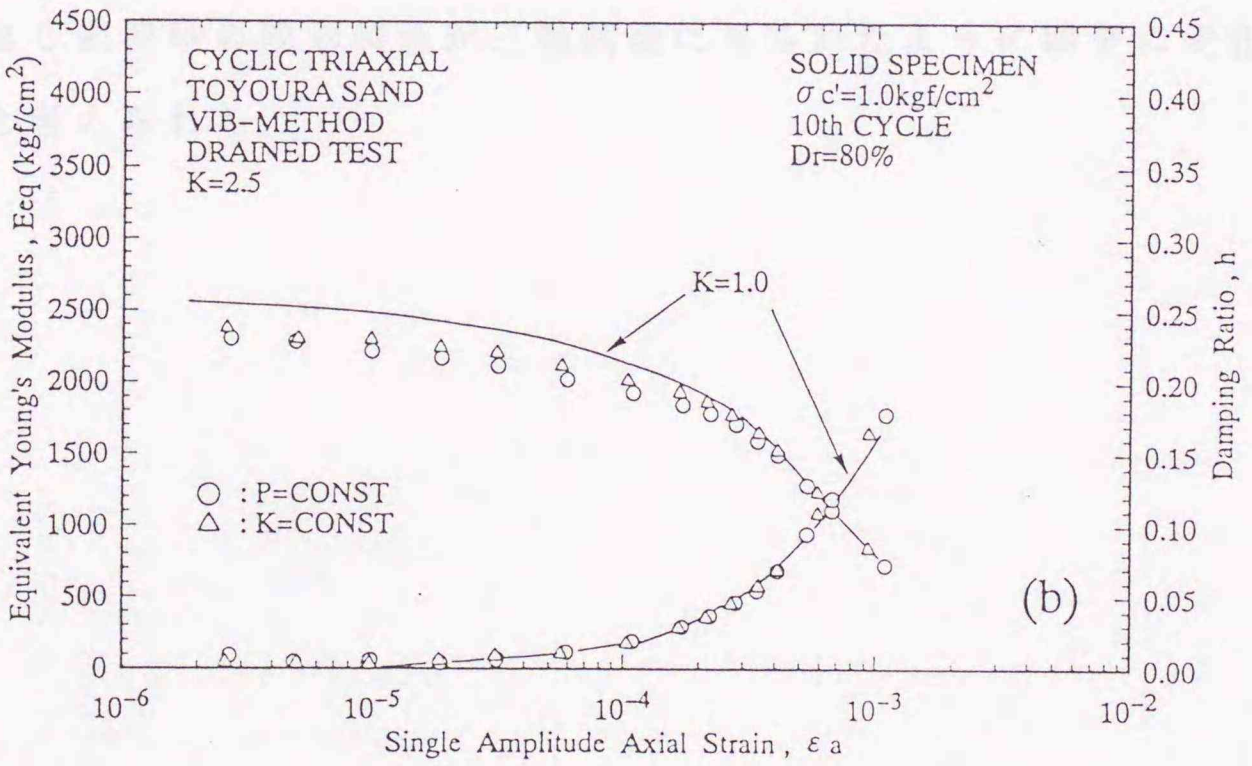


図４－20　応力履歴を与える際の圧密経路の影響（三軸試験・排水載荷）
（a）Ｋ＝０．４　（b）Ｋ＝２．５

２）中空ねじり試験

一方、中空ねじり試験において、異方圧密履歴の影響は三軸試験と異なっている。図４－21は、三軸試験と同様に等方圧密およびＫ＝０．５，２．０の異方圧密履歴を与えたＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ供試体に対する結果を示している。なお、中空ねじり試験では繰返し載荷を排水状態で与えている。

図より中空ねじり試験によって得られたＧeqおよびｈに対しては、どの供試体作製方法においてもひずみレベルによらず全く異方圧密履歴の影響は現れていない。また、この傾向は３．４節で示した中空ねじり試験による液状化強度に及ぼす影響と同じである。

このように、異方圧密履歴が繰返し変形特性に及ぼす影響は、三軸試験においては影響を受けるが、中空ねじり試験においては影響を受けないことが分かった。これは、三軸試験の場合は、異方圧密時の主応力方向（０°または９０°）と繰返し載荷時の主応力方向（０°と９０°で交番）が一致するのに対して、中空ねじり試験では、異方圧密履歴を与えた際の主応力方向（０°または９０°）と繰返し載荷時の主応力方向（±４５°）が異なるため、異方圧密履歴を受けても繰返し載荷時の変形特性が三軸試験に見られたように顕著に変化しなかったものと考えられる。

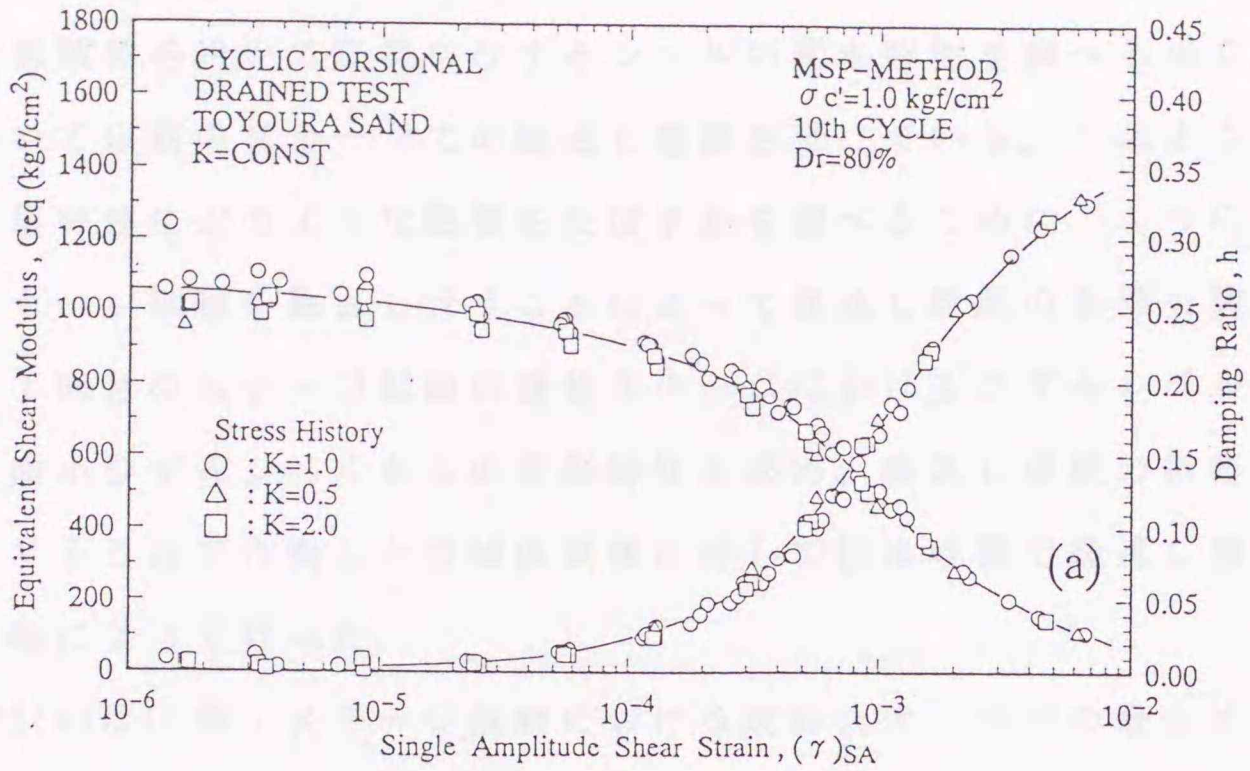


図４－21　Ｇeqおよびｈに及ぼす異方圧密履歴の影響
（中空ねじり試験・排水載荷）
（a）ＭＳＰ供試体　（b）ＶＩＢ供試体　（c）ＣＥ供試体

４．３．３　繰返し履歴の影響

１つの供試体を用いて広範なひずみレベルの変形特性を調べる場合、各ステージにおいて以前のステージでの繰返し履歴を受けている。このような繰返し履歴が変形特性にどのような影響を及ぼすかを調べるために、１つの供試体に対してステージ試験を繰返し行うことによって繰返し履歴の影響を調べた。具体的には１回目のステージ試験の最終ステージにおけるひずみレベルを変化させ、再び微小ひずみレベルからの変形特性を求め、繰返し履歴の影響を調べた。試験は、ＶＩＢ法で作製した豊浦供試体に対して排水状態で繰返し載荷を与えた三軸試験によって行った。

図４-22(a)は、第１ステージ試験における最終ステージでの最大片振幅軸ひずみが２．３×１０$^{-3}$の場合について、第１回ステージ試験と第2回ステージ試験の結果を示したものである。図に示すように、第２回目のステージ試験におけるＥeqが低下していることが分かる。また、減衰係数も２回目の方が低下している。一方、図４-22(b)は、第１ステージ試験における最終ステージでの最大片振幅軸ひずみが２．２×１０$^{-4}$の場合について同様な結果を示したものである。この場合は、図４－22(a)に比較して第２回目のステージ試験におけるＥeqが低下が少ない。このように第１回目のステージ試験における最大ひずみの大きさによって、その後の変形特性が変化することが分かる。

図４－23は第１回目のステージ試験での最大片振幅軸ひずみと１回目と２回目のステージ試験での$(\varepsilon a)_{SA}$＝１０$^{-6}$におけるＥeqの比との関係を示したものである。図に示すように、繰返しひずみ履歴の大きさが大きくなるほどＥeqが低下していることが分かる。繰返し履歴に関して、Drnevichら（1970）は６×１０$^{-4}$のひずみ履歴を6×１０^{3}回加えた場合、最大３０％微小ひずみレベルの剛性が増加することを示している。また、Teachavorasinskunら(1992）は３～７×１０$^{-4}$程度の繰返し履歴を７，０００～５００，０００回加えても剛性はほとんど変化しないと報告しており、本研究結果と異なっている。図４－24は第１回目のステージ試験終了時に残留している軸ひずみと１回目のステージ試験と２回目のステージ試験での１０$^{-6}$でのＥeqの比との関係を示したものである。図から分かるように第１回目のステージ試験終了時には伸張側に供試体が変形していることが分かる。また、その関係も伸張側への変形量が大きいほど

Ｅeqの低下も著しいことが分かる。この傾向は、先に示したＶＩＢ供試体に伸張の異方圧密履歴を与えた場合の結果に符合するものである。したがって、ＶＩＢ供試体の場合は伸張方向に応力履歴を受けた場合、静的履歴および繰返し履歴に関わらず剛性が低下すると言える。このことは、同じ繰返し履歴であっても伸張側にひずみが残留しない履歴を受けた場合や、供試体作製方法が異なる場合には、異なる結果となることも予想される。

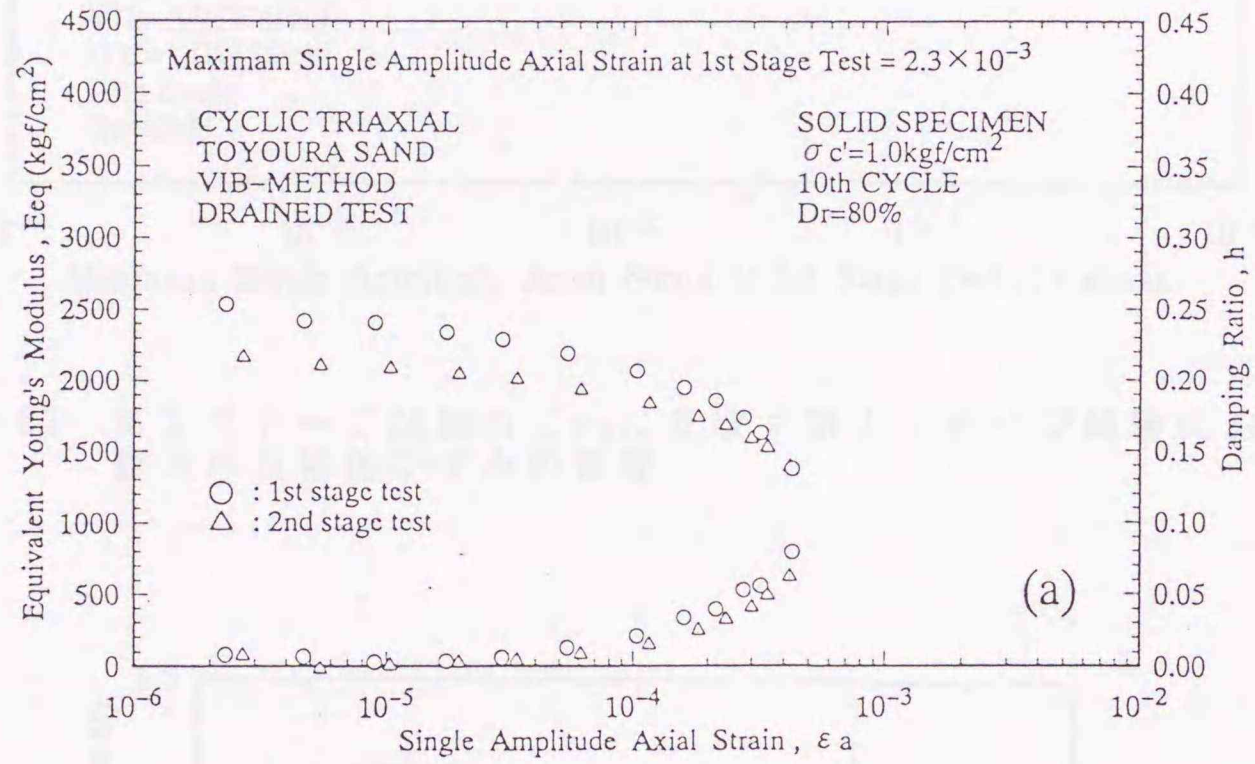


図４－22　繰返し履歴の影響
(a)第１ステージ試験における最大片振幅軸ひずみ $\varepsilon a = 2.3 \times 10^{-3}$
(b)第１ステージ試験における最大片振幅軸ひずみ $\varepsilon a = 2.2 \times 10^{-4}$

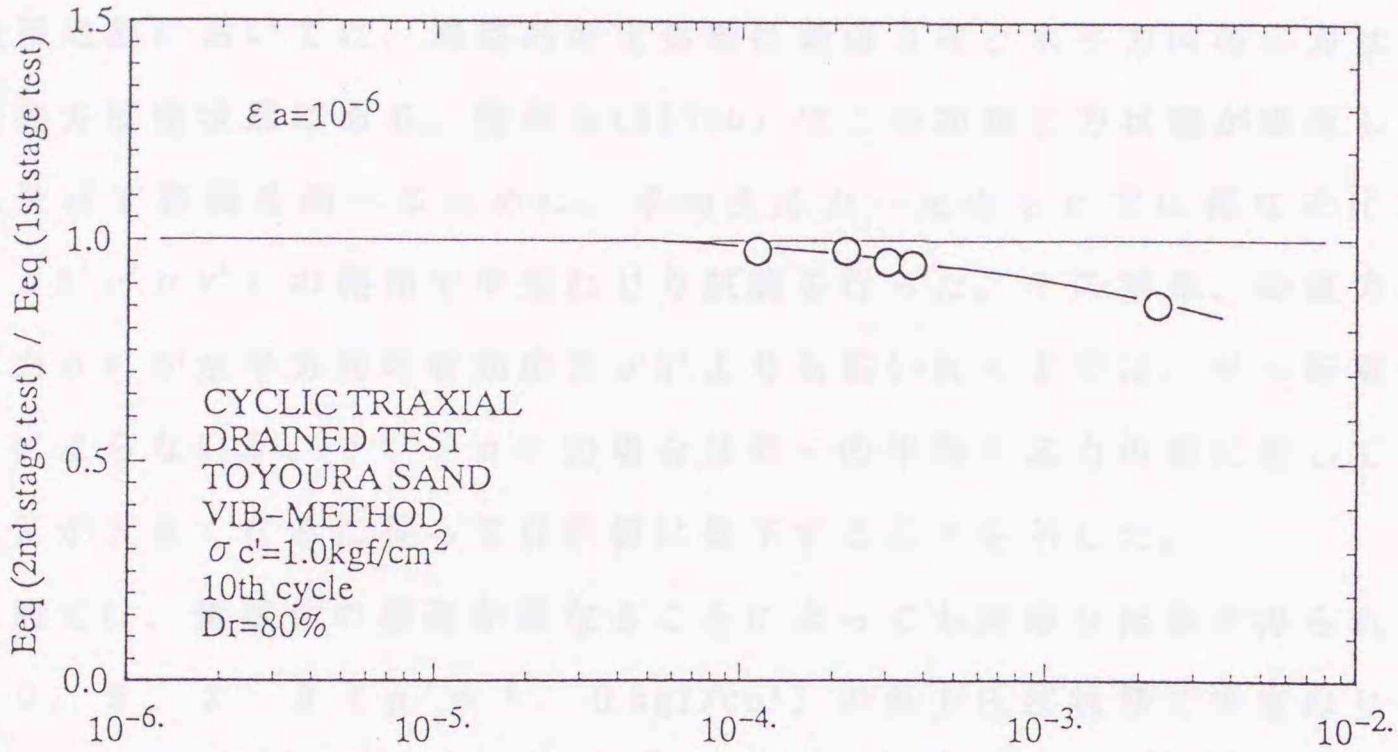


図 4 － 23　第 2 ステージ試験の Ｅeqに及ぼす第 1 ステージ試験における
最大片振幅軸ひずみの影響

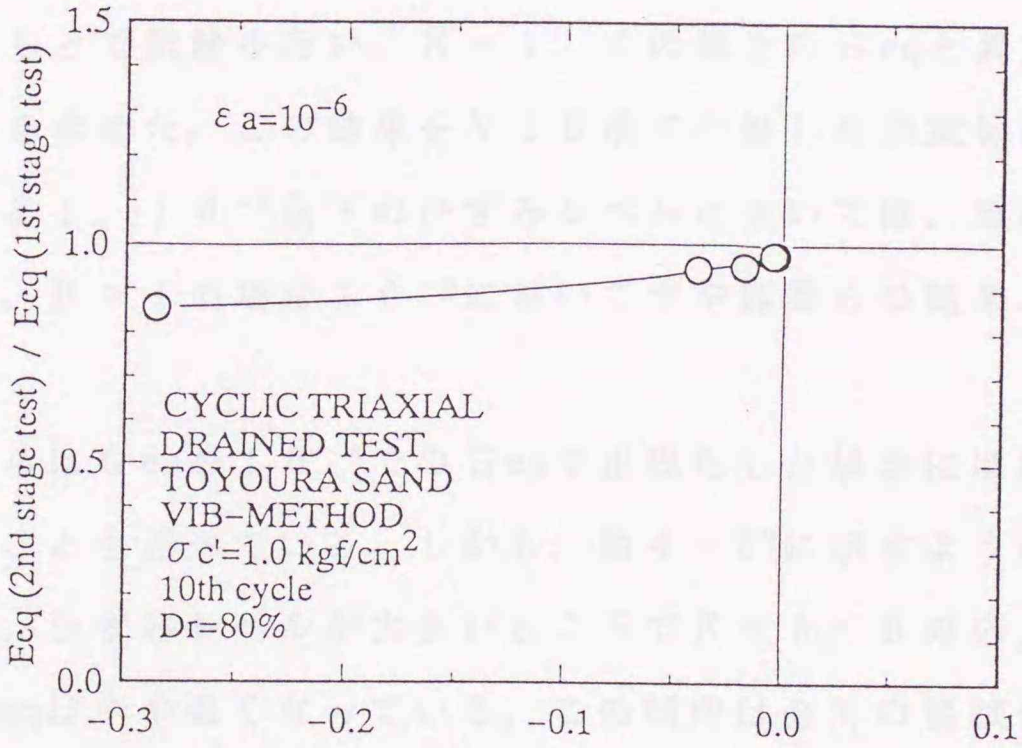


図 4 － 24　第 2 ステージ試験の Ｅeqに及ぼす第 1 ステージ試験における
残留軸ひずみの影響

４．４　初期応力状態の影響

水平地盤においては、地盤内の土要素は鉛直方向と水平方向の応力状態が異なる異方圧密状態にある。龍岡ら(1979b)はこの初期応力状態が繰返し変形特性に及ぼす影響を調べるために、平均主応力一定のもとで広範な主応力比Ｋ（＝σh'／σv'）の範囲で中空ねじり試験を行った。その結果、鉛直方向の有効応力σv'が水平方向の有効応力σh'よりも高いＫ＜１では、せん断剛性率ＧはＫによらないが、σh'＞σv'の場合は同一の平均主応力の値に対しても主応力比Ｋが大きくなるに従ってＧの値は低下することを示した。

本節では、供試体の構造が異なることによっても同様な結果が得られるかを、Ｋ＝０．５，２．０（ｐ'＝１．０kgf/cm²）の異方圧密状態で中空ねじり試験を行い検討した。

図４－25は、ＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法で作製した供試体に対する結果を示したものである。龍岡らが示したようにＫ＝２．０の場合のみどのひずみレベルにおいてもＧeqが低くなっている。この傾向はどの供試体作製方法においても認められる。龍岡らは図４－26に示すように、中空ねじり試験によって種々の圧密応力比のもとで試験を行い、Ｋ＝１．０の場合のＧeqと異方圧密状態でのＧeqとの関係を求めた。この結果をＶＩＢ法で作製した供試体に対する本研究結果と比較すると、10^{-4}以下のひずみレベルにおいては、ほぼ同様な関係となっているが、Ｋ＞１の場合10^{-3}においてやや龍岡らの結果よりも低くなっている。

また、龍岡らはＧeqを10^{-6}でのＧeqで正規化した場合には圧密応力比の影響を受けないことも述べている。しかし、図４－27に示すようにＧeqを正規化した場合でも、ひずみレベルが大きいところでＫ＝２．０の応力状態で求めた正規化したＧeqはやや低くなっている。この傾向は全ての供試体に対して言えることである。

また、図４－25に示した減衰比ｈと$(\gamma)_{SA}$との関係においてもひずみレベルが大きくなるとＫ＝２．０の応力状態ではｈが他の応力状態での結果よりも高くなっている。

このように、初期応力状態が異なることによって、得られるＧおよびｈは鉛

直方向よりも水平方向の応力が高いＫ＞１の場合のみ変化することが分かった。したがって、一般に原位置においては水平方向よりも鉛直方向の応力が高い状態（Ｋ＜１）にあるので、原位置のＫ値が推定されていれば、平均主応力を原位置での値に合わせておけば、等方圧密した供試体に対して繰返し変形特性を求めても、原位置と同じＧeqを再現し得ることを意味している。

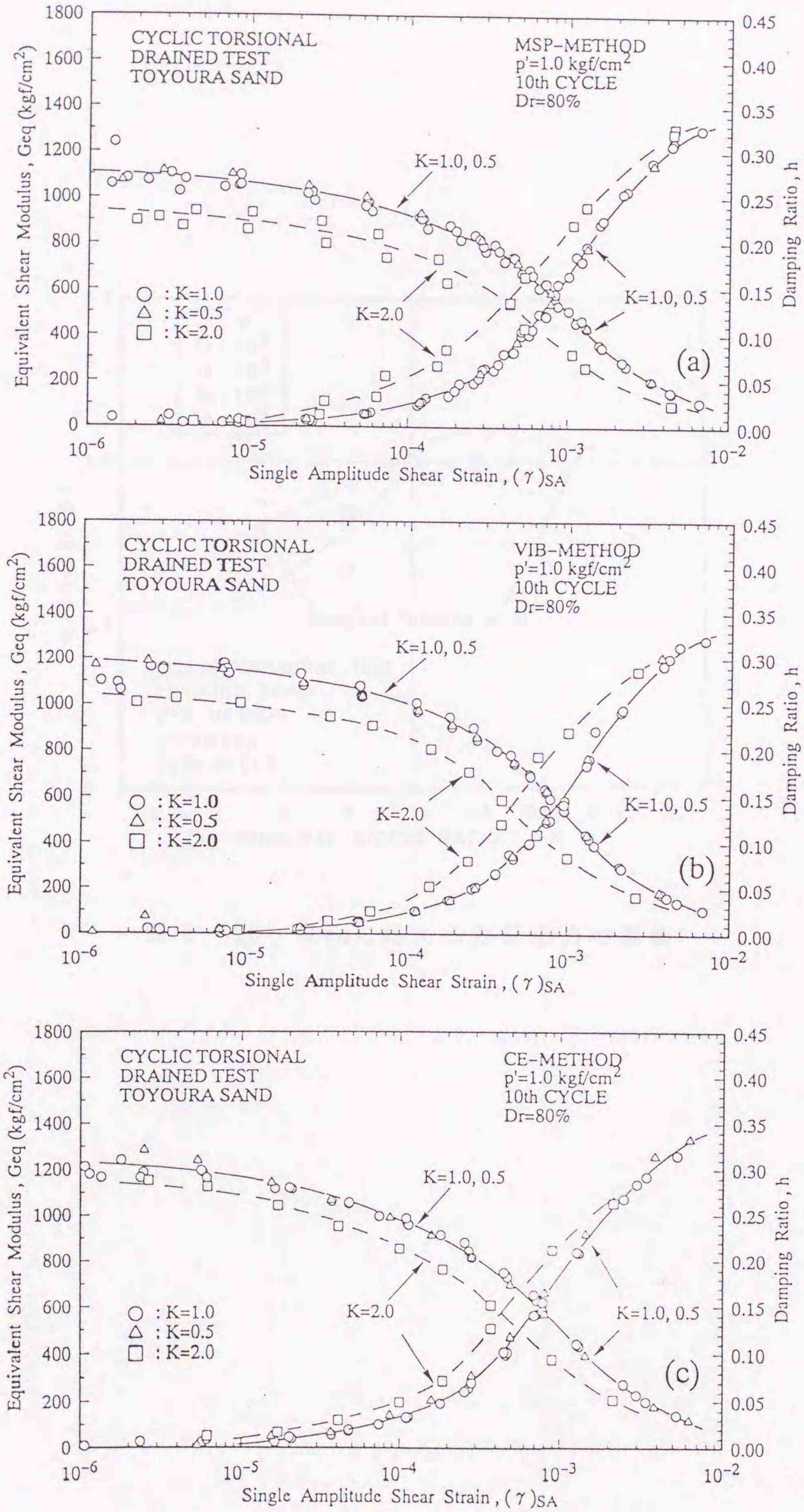


図 4 － 25　初期応力状態の影響
（a）ＭＳＰ供試体　（b）ＶＩＢ供試体　（c）ＣＥ供試体

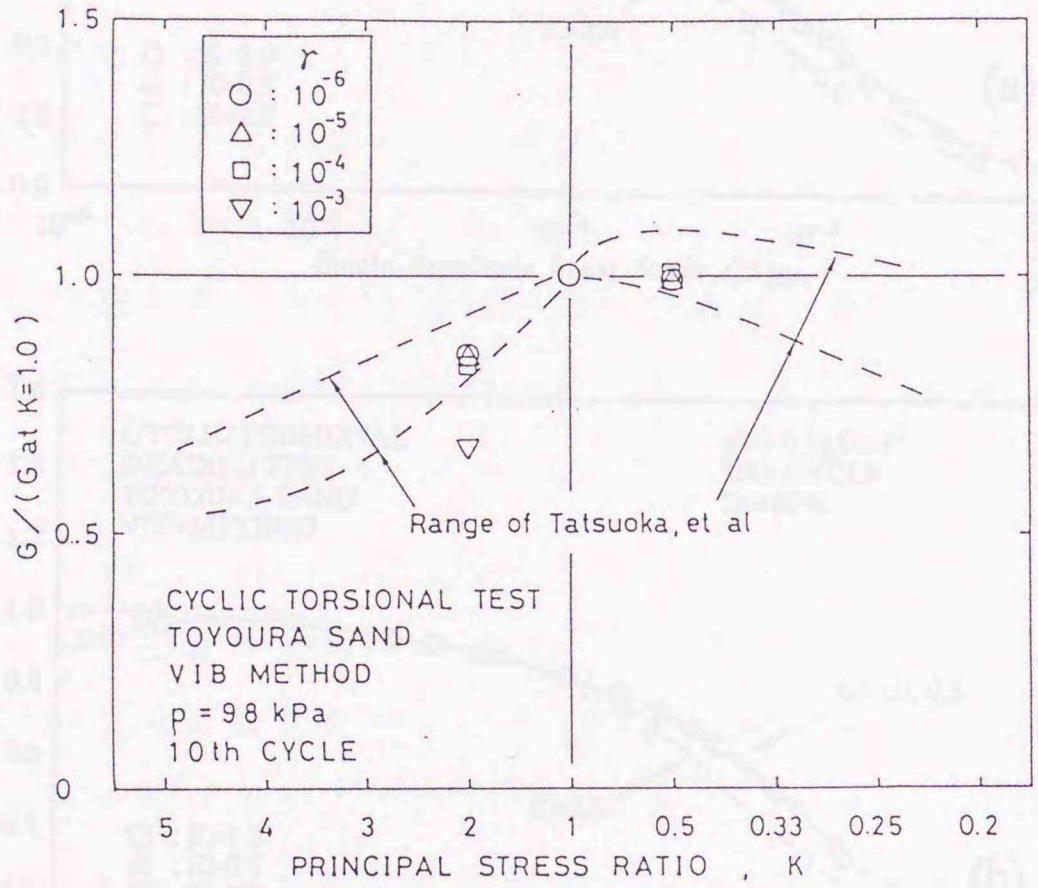


図４－26　Ｇeqに与える初期応力の影響

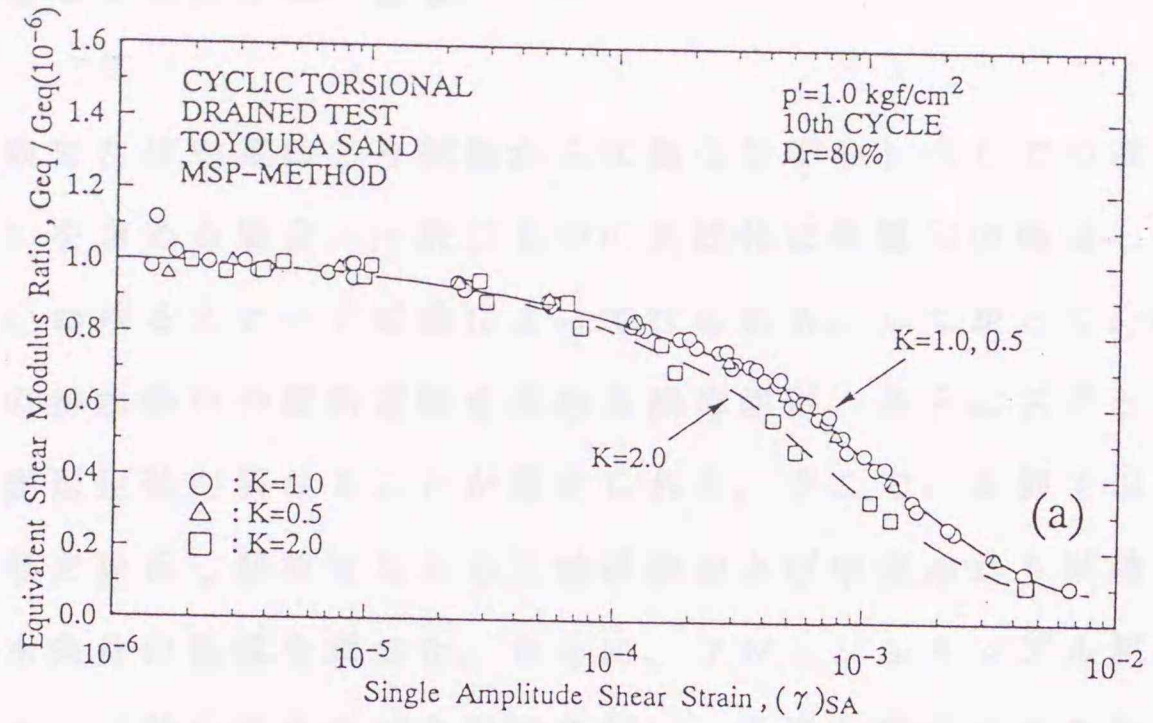


図４－27　正規化したＧeqに及ぼす初期応力の影響
（a）ＭＳＰ供試体　（b）ＶＩＢ供試体　（c）ＣＥ供試体

4．5　繰返し載荷方法の影響

三軸試験または中空ねじり試験から広範なひずみレベルでの変形定数（Eeq, Geq, h）を求める場合、一般に1つの供試体に多数回の繰返し載荷を段階的に加えるいわゆるステージ試験によって行われる。したがって、繰返し載荷を与える際の排水条件や変形定数を求める載荷回数、さらにステージ数によって、得られる変形定数が異なることが考えられる。そこで、本節では、排水および非排水状態で繰返し載荷を与える三軸試験および中空ねじり試験を行い、載荷回数と排水条件の影響を調べた。さらに、フレッシュサンプル試験と1つの試験でのステージ数を変化させた試験を行い、繰返し載荷方法の相違によって変形定数がどのように変化するかを調べた。また、繰返し載荷の波形の影響についても検討している。

4．5．1　載荷回数の影響

多数回の繰返し載荷を段階的に加えて変形定数を求める場合、求める載荷回数により得られる値が異なることが知られている。そこで、排水および非排水状態で中空ねじり試験を行い、変形係数を求める載荷回数の相違による変化を調べた。

図4－28は、排水状態および非排水状態で繰返し載荷を与えた中空ねじり試験による1サイクルから10サイクルまでの、それぞれの載荷回数で求めた等価せん断剛性率Geqおよび減衰比hと片振幅せん断ひずみ$(\gamma)_{SA}$との関係を示したものである。図より、$(\gamma)_{SA}=10^{-6}\sim10^{-4}$程度のひずみの範囲では、極微小なひずみレベル（$(\gamma)_{SA}<3\times10^{-6}$）で測定精度の誤差のためGeqおよびhに多少のバラツキはあるものの載荷回数による差は認められないのに対し、ひずみレベルが大きくなるとGeqおよびhを求める載荷回数により差が現れることが分かる。図中には2サイクル目と10サイクル目で求めたGeq、hと$(\gamma)_{SA}$との関係をラインで示しているが、載荷回数が大きくなるとGeqはやや増加しhは減少している。しかし、この傾向は$(\gamma)_{SA}=3\times10^{-4}$以降では試験時の排水条件によって異なっている。

図4－29には10および5サイクル目で求めたGeqおよびhと、2サイクル

目で求めたGeqおよびhの差と（γ）$_{SA}$との関係を示している。Geqは（γ）$_{SA}$＝5×10^{-5}程度からhは2×10^{-5}程度から載荷回数による差が現れている。また、（γ）$_{SA}$＝10^{-4}程度から排水条件の相違によって差が現れ、図4－28からも分かるように排水状態で試験を行った場合には、載荷回数とともにGeqは一貫して増加しているが、非排水状態では逆に減少に転じている。一方hは、排水状態の場合、載荷回数とともに減少するが、非排水状態では（γ）$_{SA}$＝10^{-3}程度から逆に増加している。

このように排水条件によって載荷回数によるGeqおよびhの変化の傾向が異なるのは、非排水状態で試験を行う場合、ひずみレベルがある値より大きくなると、繰返し載荷により間隙水圧が発生し有効応力が減少するためと考えられる。

図4－30には排水状態および非排水状態で繰返し載荷を与えたときのヒステリシスループを示している。ひずみレベルが大きいところでのヒステリシスループを比較すると、排水状態では繰返し載荷回数の増加とともにループが内側に入り供試体が硬化していることが分かる。一方、非排水状態では逆に繰返し載荷とともに間隙水圧が発生し有効応力が低下するためループが広がり、排水条件によって形状が異なることが分かる。図4－31には2サイクル目および10サイクル目終了時に残留している間隙水圧を示しているが、この図からも非排水条件では載荷回数によって有効応力状態が異なっていることが分かる。

また、図4－32には2サイクル目と10サイクル目で求めたGeqおよびhを排水条件で比較している。図より2サイクル目で求めたGeqおよびhには排水条件の影響はあまり現れていないが、10サイクル目で求めたGeqおよびhはひずみレベルが大きくなると、非排水状態で繰返し載荷を与えた場合、Geqはやや低くhはやや高くなっている。これは間隙水圧が2サイクル目よりも発生していることから、排水条件によって10サイクル目における有効応力が異なっているためである。ただし、hはおよそ3×10^{-3}を越えると非排水状態で繰返し載荷を与えた場合逆に低下している。安田ら（1983）によれば、hは非排水状態で試験を行うとγ＞10^{-3}で排水試験よりも低下することを示している。これは、非排水状態の場合ひずみレベルが大きくなると応力経路が変相線を越え履歴曲線が紡錘形とならないためhが低下するとしている。したがって、上

記のような相反する２つの因子が組合わさってひずみレベルが大きなところでのｈに差が生じたものと言える。

このように変形係数を定義する載荷回数によって得られる関係は異なり、特にひずみレベルが大きくなると載荷回数の差が顕著に現れることが分かった。

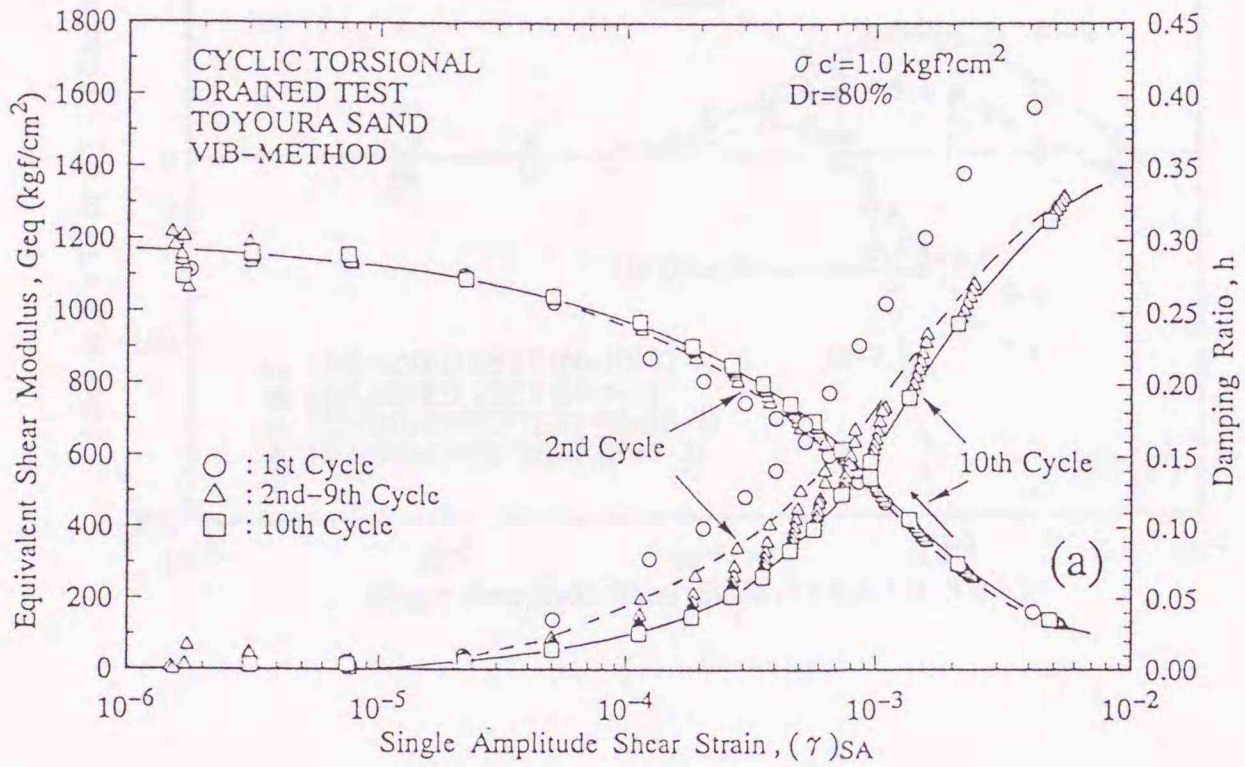
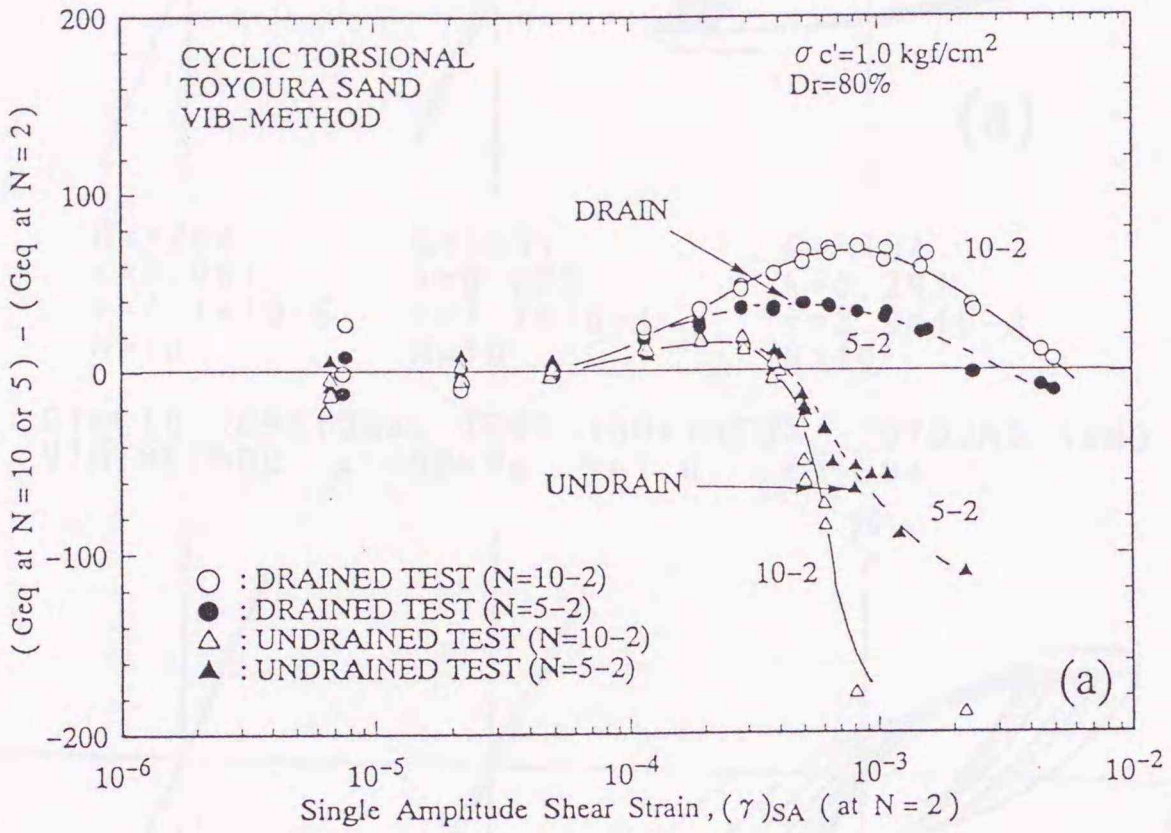


図４－28　Ｇeqおよびｈに及ぼす載荷回数の影響（中空ねじり試験）
(a)排水載荷　(b)非排水載荷



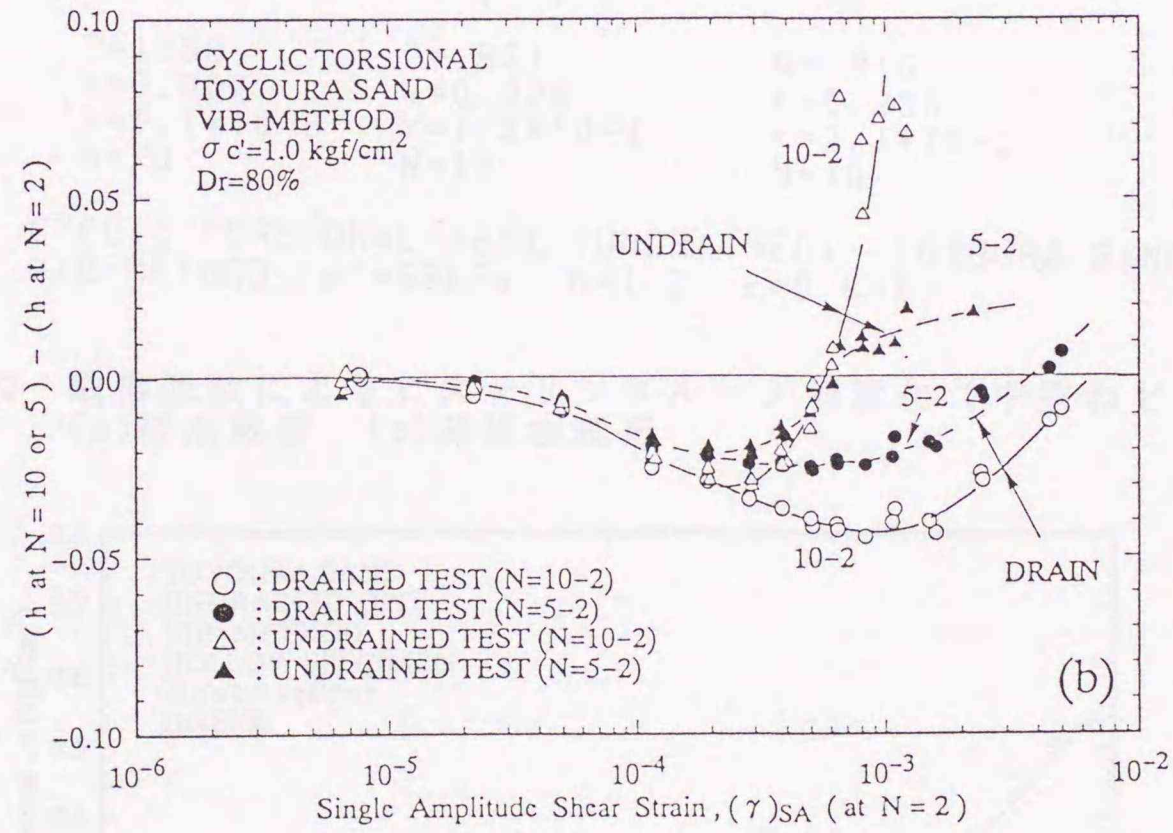
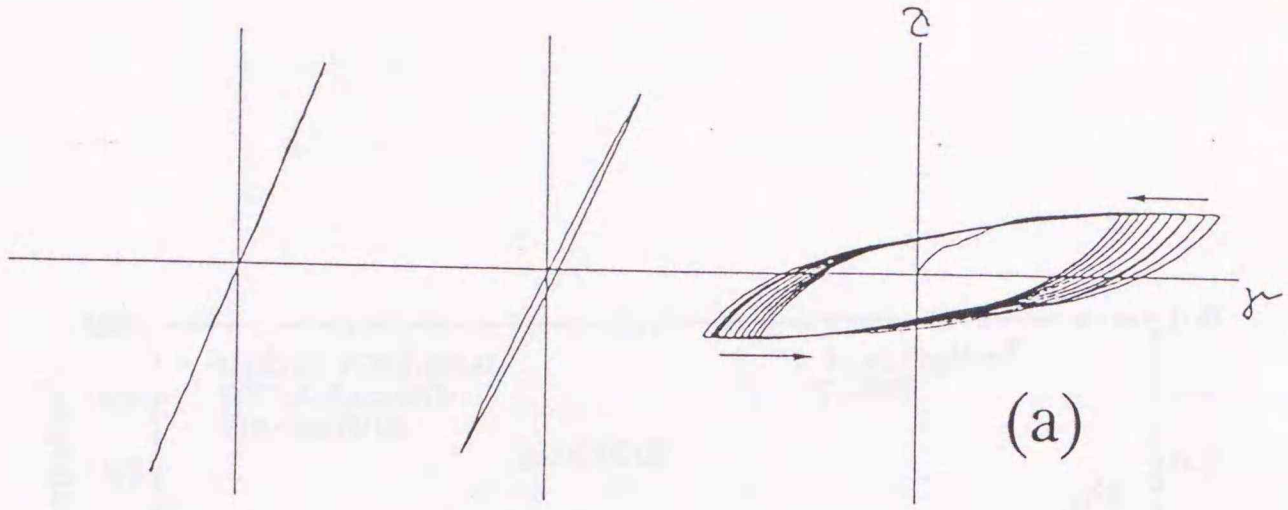


図 4 － 29　載荷回数による (a)Geq および (b)h の変化

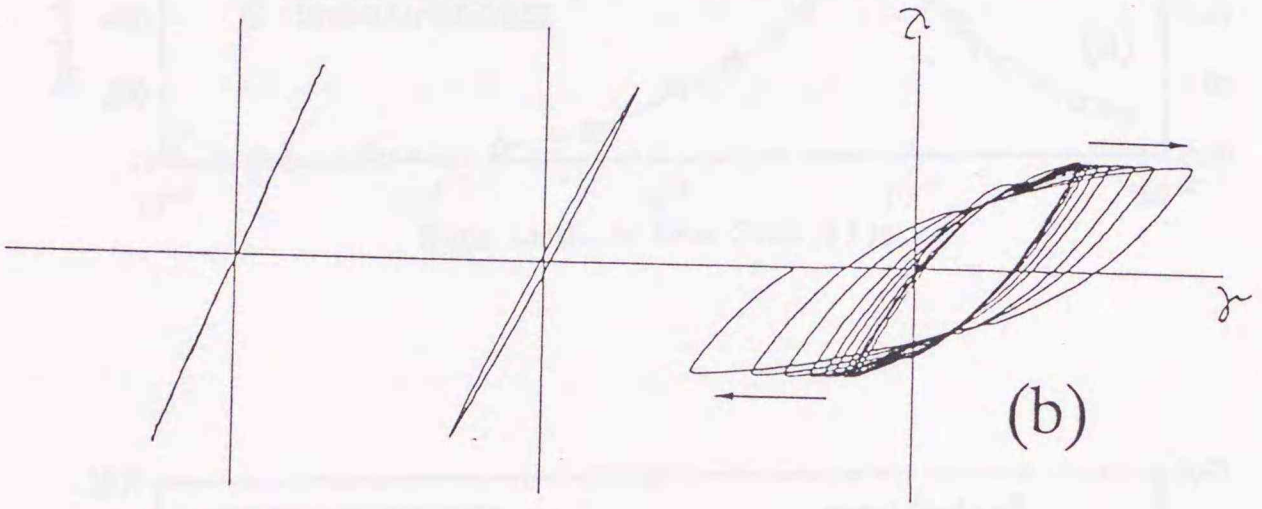


G=1204
h=0.001
τ=7.4*10-6
N=10

G=1031
h=0.025
τ=1.1*10-4
N=10

G= 184
h=0.291
τ=3.9*10-3
N=10

CYCLIC TORSIONAL TEST (DRAINED) TOYOURA SAND
VIB-METHOD p'=98kPa K=1.0 e=0.684



G=1150
h=0.002
τ=7.1*10-6
N=10

G= 971
h=0.026
τ=1.2*10-4
N=10

G= 216
h=0.263
τ=2.1*10-3
N=10

CYCLIC TORSIONAL TEST (UNDRAINED) TOYOURA SAND
VIB-METHOD p'=98kPa K=1.0 e=0.692

図４－30　載荷回数によるヒステリシスループの変化（中空ねじり試験）
(a)排水載荷　(b)非排水載荷

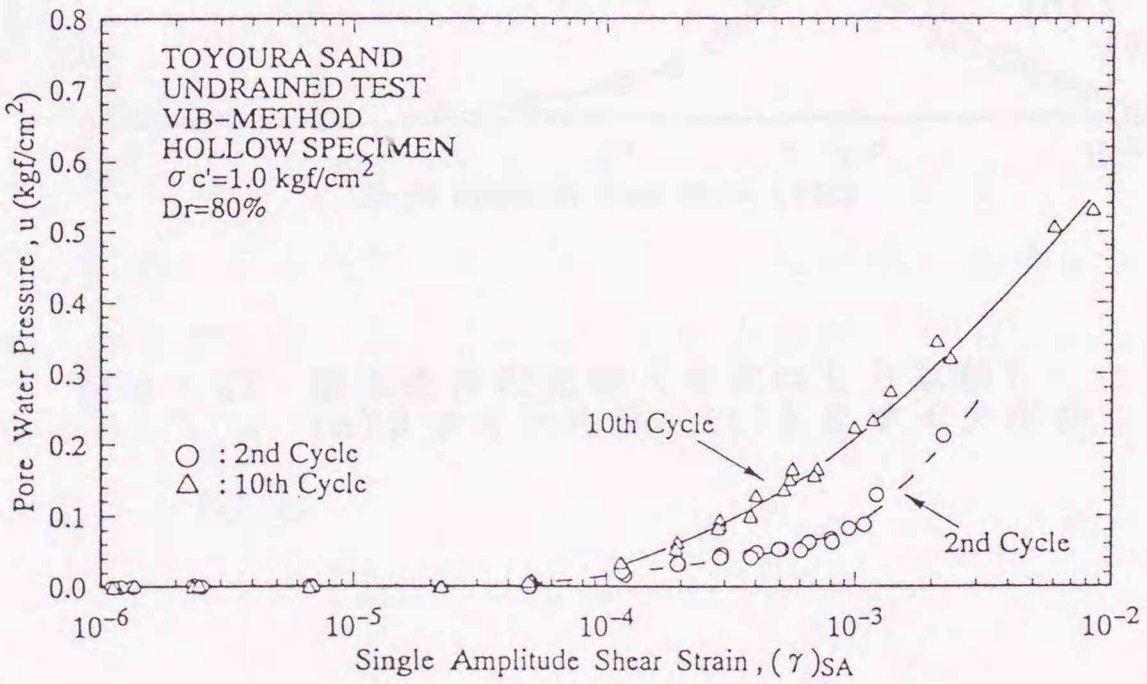
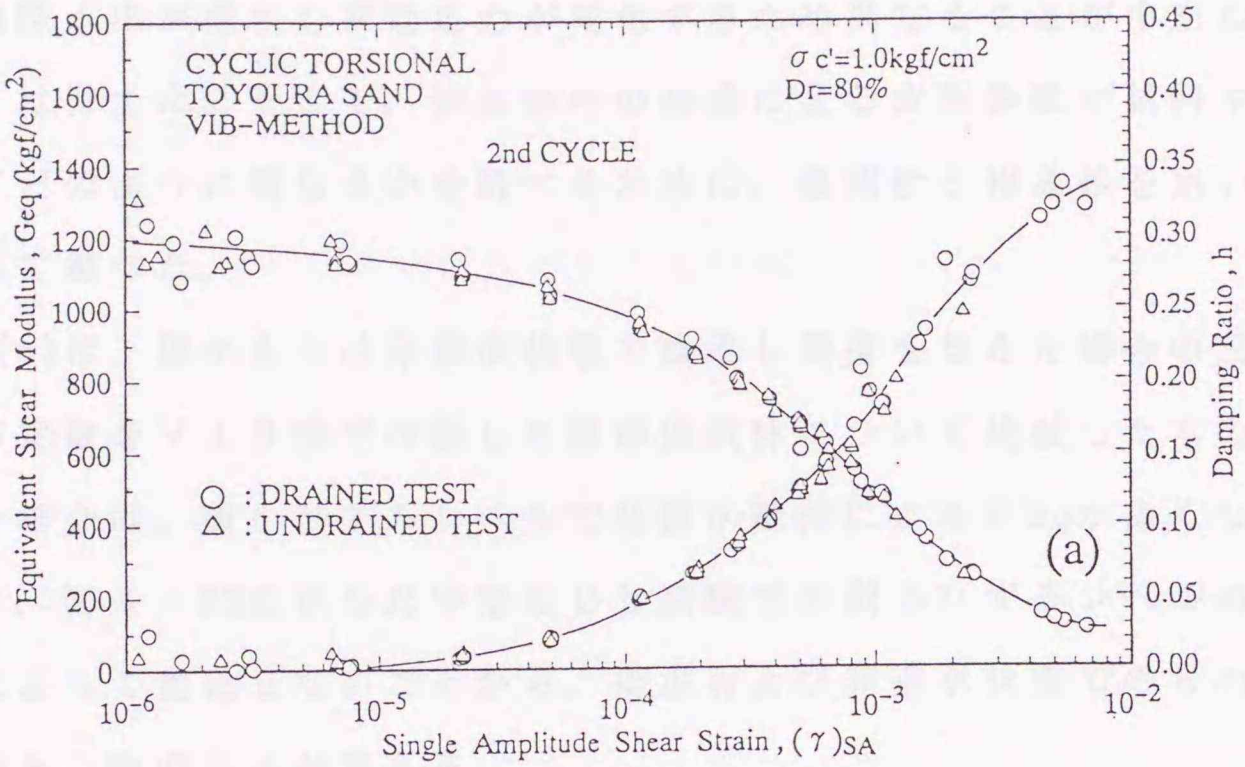


図４－31　２サイクルおよび１０サイクル終了時の間隙水圧



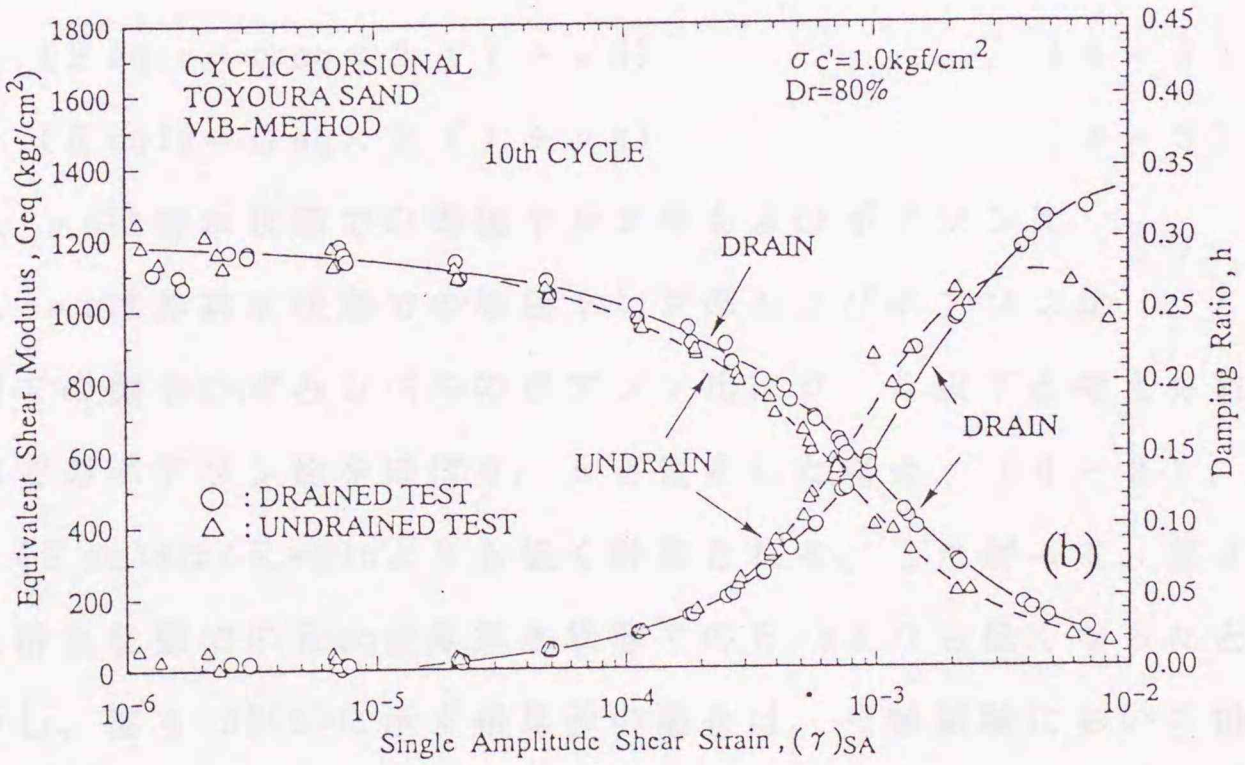


図４－32　排水条件の比較（中空ねじり試験）
（a）２サイクル目　（b）１０サイクル目

4．5．2　排水条件の影響

上記のように排水条件の相違によって、得られる変形定数は微小なひずみレベルでは変化しないが、ひずみレベルが大きくなるにしたがって、繰返し載荷とともに間隙水圧が発生し有効応力が変化するため異なることが中空ねじり試験においては言えた。そこで、排水条件の相違による変形係数が試料や試験方法によってどのように異なるかを調べるために、豊浦砂と相馬砂を用いて三軸試験によって調べた。

図4-33(a)は、排水または非排水状態で繰返し載荷を与えた場合の三軸試験による変形定数をＶＩＢ法で作製した豊浦供試体について比較したものである。三軸試験の場合は、微小ひずみレベルで非排水載荷によるＥeqが高くなっている。ここで、図4－32に示した中空ねじり試験での微小ひずみレベルのＧeqは、排水条件によって変化しないことから、排水および非排水状態でのＥeqを以下の式で表すと、次のことが言える。

$$(Geq)d=(Geq)u=\frac{(Eeq)d}{2(1+\nu d)}=\frac{(Eeq)u}{2(1+\nu u)} \qquad (4-1)$$

$$\therefore(Eeq)d=Geq\times 2(1+\nu d) \qquad (4-2)$$

$$(Eeq)u=Geq\times 2(1+\nu u) \qquad (4-3)$$

(Eeq)d、νdは排水状態での等価ヤング率およびポアソン比

(Eeq)u、νuは非排水状態での等価ヤング率およびポアソン比

排水状態での微小ひずみレベルのポアソン比は0．5以下と考えられるので、非排水状態でのポアソン比をほぼ0．5と仮定した場合、（4－2），（4－3）式から(Eeq)dは(Eeq)uよりも低く計算される。したがって、図4-33(a)で示された排水状態でのＥeqが非排水状態でのＥeqよりも低くなったと考えられる。しかし、図4-33(b)に示す相馬砂の場合は、三軸試験において排水条件の影響はほとんど現れておらず、排水状態での三軸試験におけるポアソン比は、試料によって大きく異なることが分かる。非排水載荷でのポアソン比を0．5と仮定し、排水載荷における10^{-6}でのポアソン比を次式から推定した場合、表4－2に示すようになる。

$$\nu d=(3Ed/2Eu)-1 \qquad (4-4)$$

表４－２　推定したポアソン比

試　料	Ｄｒ	ＭＳＰ	ＶＩＢ	Ｃ　Ｅ
豊浦砂	６０	０．２９	０．３６	０．３４
	８０	０．２４	０．２９	０．３５
相馬砂	８０		０．４６	

表より推定された νdの値は同じ試料でも供試体作製方法や密度によって異なることが分かる。表４－２の結果は中空の供試体を用いた結果であるが、中実供試体を用いた場合ＶＩＢ法でνｄ＝０．２１（Ｄｒ＝８０％），０．２６（Ｄｒ＝６０％）となり、供試体の形状によっても多少異なる計算結果が得られた。

一方、ひずみレベルが大きくなると、非排水条件で繰返し載荷を与えた場合、間隙水圧が発生し有効応力が低下するため排水状態で求めたＥeqよりも低くなり、またｈは高くなっている。このように、排水条件の相違により得られる変形定数が異なることが分かる。

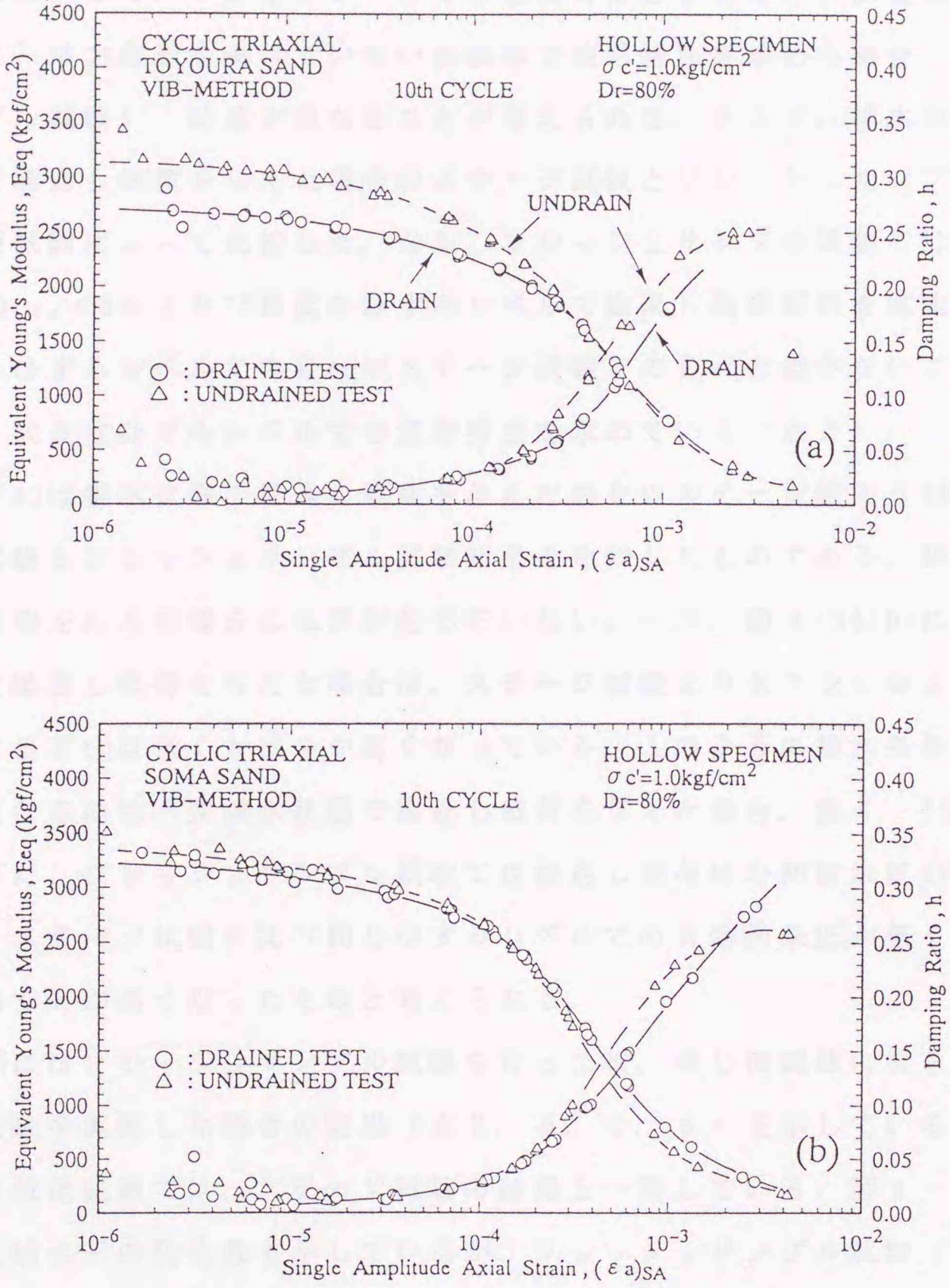


図 4 － 33　排水条件の影響（三軸試験）　(a)豊浦砂　(b)相馬砂

4．5．3　ステージ数の影響

4．3．3で述べたように1つの供試体を用いて広範なひずみレベルの変形特性を調べる場合、各ステージにおいて以前のステージでの繰返し履歴を受けている。それに対して、各ひずみレベルでの変形特性を求めるために複数の供試体を用いて、応力履歴を受けていない供試体で変形特性を求めた場合（フレッシュサンプル試験）、結果が異なることが考えられる。そこで、排水および非排水状態で繰返し載荷を与えた場合のステージ試験とフレッシュサンプル試験結果を三軸試験によって比較した。なお、フレッシュサンプル試験ではあらかじめ（$\varepsilon a)_{sA}=5\times10^{-6}$程度のひずみレベルで繰返し載荷試験を実施し（点1）、微小ひずみレベルでのEeqがステージ試験でのEeqと差がないことを確認した後、大きなひずみレベルでの変形特性を求めている（点2）。

図4-34(a)は排水状態で繰返し載荷を与えた場合のステージ数15回程度のステージ試験とフレッシュサンプル試験結果を比較したものである。排水状態で繰返し載荷を与えた場合には差が生じていない。一方、図4-34(b)に示す非排水状態で繰返し載荷を与えた場合は、ステージ試験よりもフレッシュサンプル試験によるEeqは低くhはやや高くなっている。このように排水条件によって結果が異なるのは、非排水状態で繰返し載荷を与えた場合、図4－35の点2に示すように、フレッシュサンプル試験では繰返し載荷時の間隙水圧の発生量が大きく、ステージ試験に比べ同じひずみレベルでの有効拘束圧が低くなるためEeqが低くhが高くなったものと考えられる。

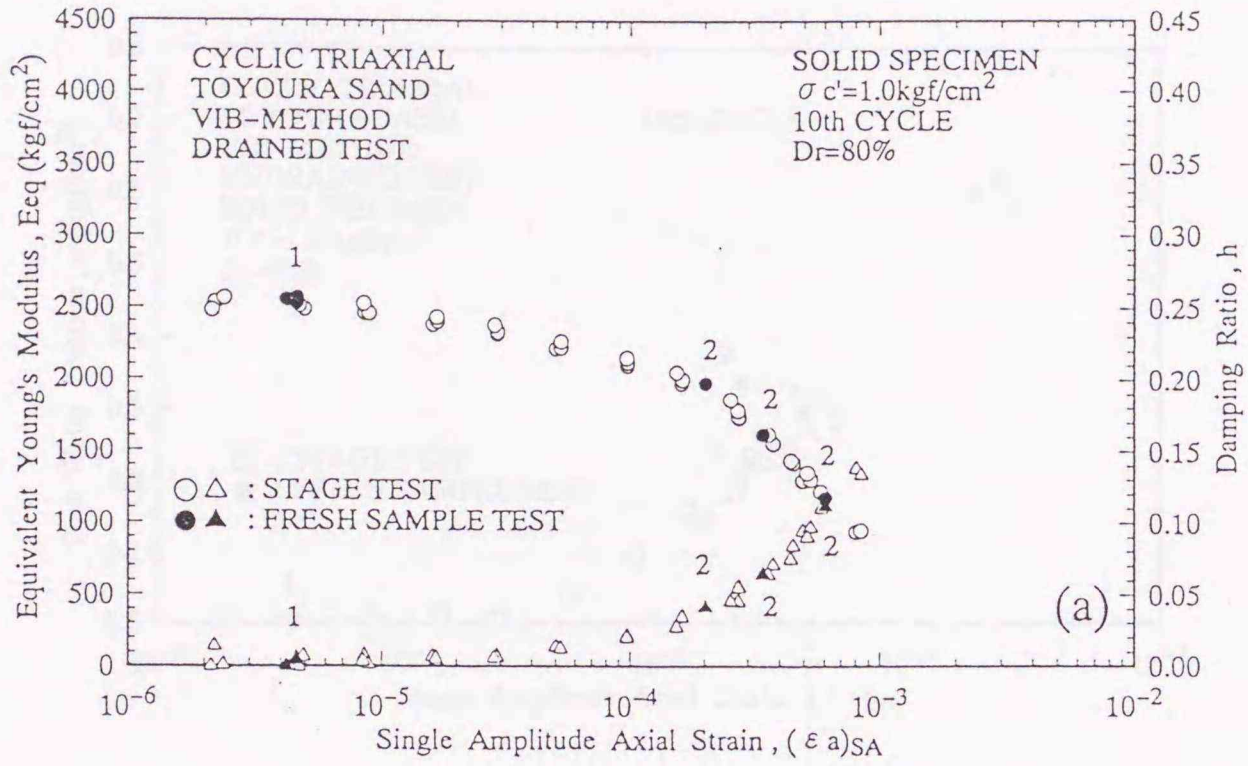
図4－36にはフレッシュサンプル試験を行った後、同じ供試体に引き続き繰返し載荷試験を実施した場合の結果（点3，4，5，6）を示している。図よりその後の載荷試験では、ステージ試験の結果と一致している。図4－35にはその時の間隙水圧の発生量も示しているが、フレッシュサンプル試験（点2）に比べ、その後の試験（点3，4，5，6）では、ステージ試験での間隙水圧の発生量と等しくなっている。このようにステージ試験とフレッシュサンプル試験では、非排水状態で繰返し載荷を与えた場合、発生する間隙水圧がステージ試験とフレッシュサンプル試験とで異なり差が生じることが分かる。

次に、繰返し載荷のステージ数をさらに増加させた場合の変形定数の変化を示す。図4－37は1つの供試体に対して、10回程度と40数回のステージ数で非

排水条件で繰返し載荷を与えた三軸試験による結果を比較したものである。図より、$(\varepsilon a)_{SA}=10^{-4}$以下のひずみレベルではEeqおよびhに差は認められないが、$(\varepsilon a)_{SA}=10^{-4}$以上ではステージ数が多くなると、Eeqは高くhは低くなっている。図4－38には各ステージにおける間隙比の変化を示しているが、広い範囲のひずみでステージ数の大小による間隙比の変化に有為な差は認められない。したがって、ステージ数の相違による変形定数の差は、間隙比の変化に起因したものではないことが分かる。

図4－39には図4－35と同様に、繰返し載荷の10サイクル終了時における過剰間隙水圧と$(\varepsilon a)_{SA}$との関係を示している。ステージ数が少ない試験における間隙水圧の発生量が高くなっている。すなわち、ステージ数が多くなると少ないステージ数で試験を行った場合よりも、以前のステージで受けた繰返し履歴によって生じる硬化の程度が高くなる。このため、間隙水圧の発生量が低く有効拘束圧が高いため、Eeqが高くhが低いと考えられる。

このように、三軸試験から変形定数を求める場合、排水状態で繰返し載荷を与えた場合には、ステージ試験とフレッシュサンプル試験による差は生じないが、非排水状態で試験を行うと、ひずみレベルが大きいところでステージ数が多くなるほどEeqが高くhが低くなることが分かった。



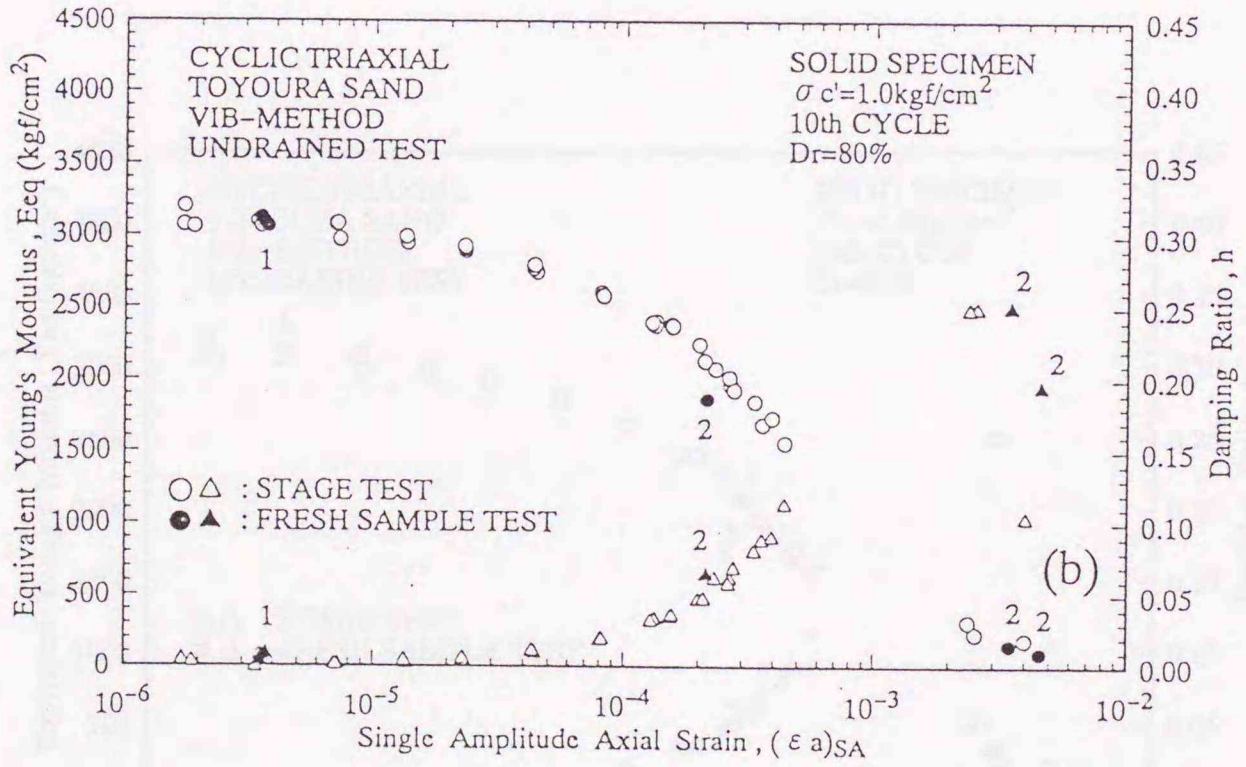


図 4 － 34　ステージ試験とフレッシュサンプル試験の比較
(a)排水載荷　(b)非排水載荷

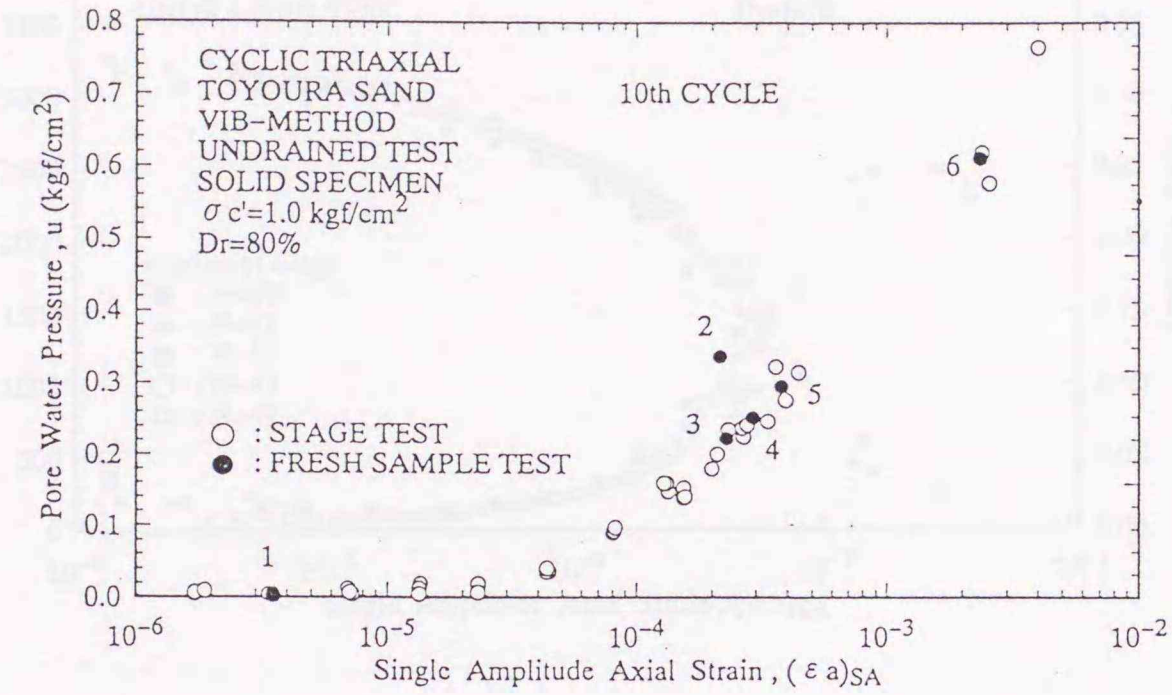


図４－35　ステージ試験とフレッシュサンプル試験における過剰間隙水圧の比較

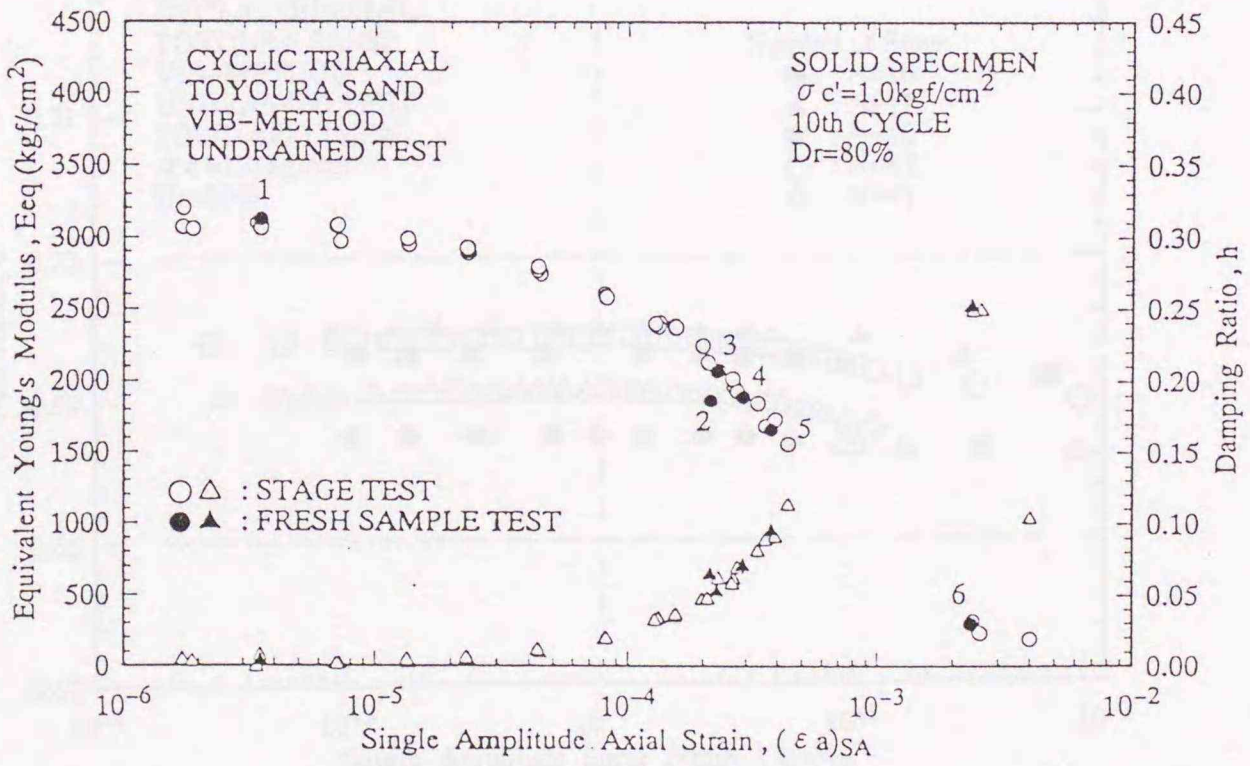


図４－36　ステージ試験とフレッシュサンプル試験の比較

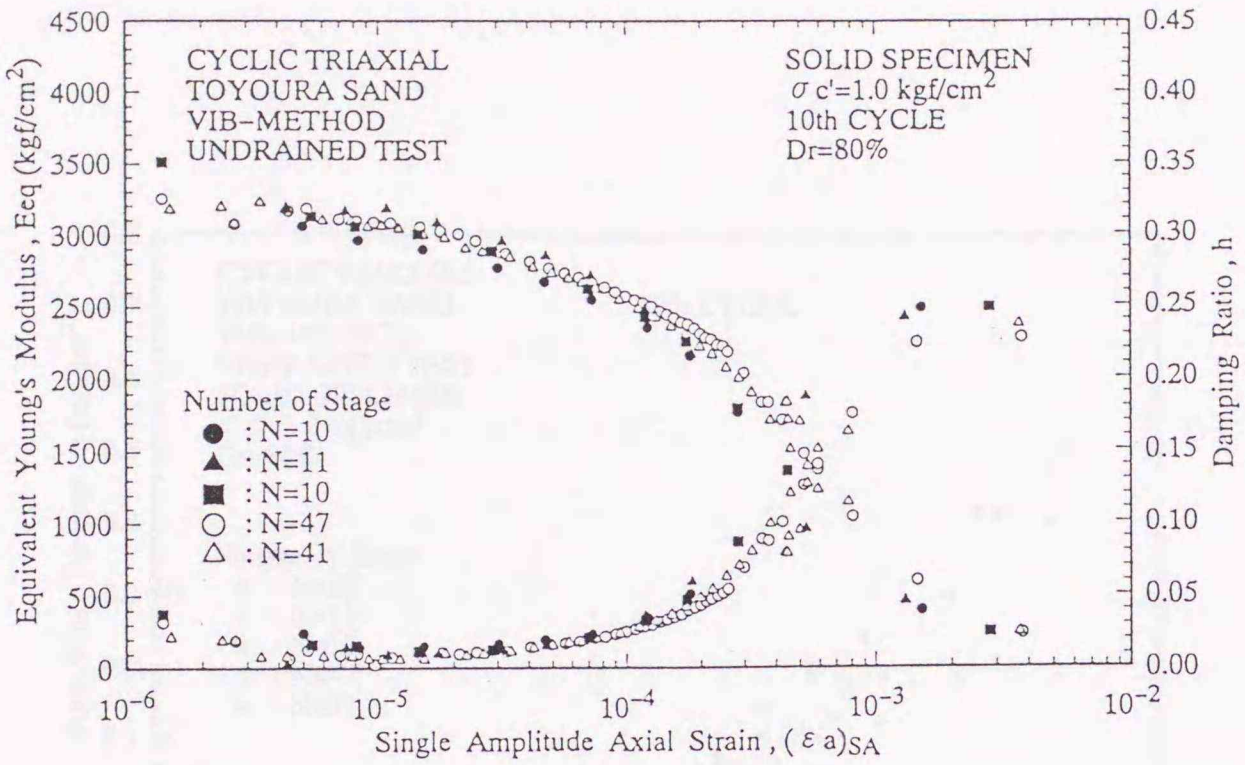


図 4 － 37　ステージ数の影響

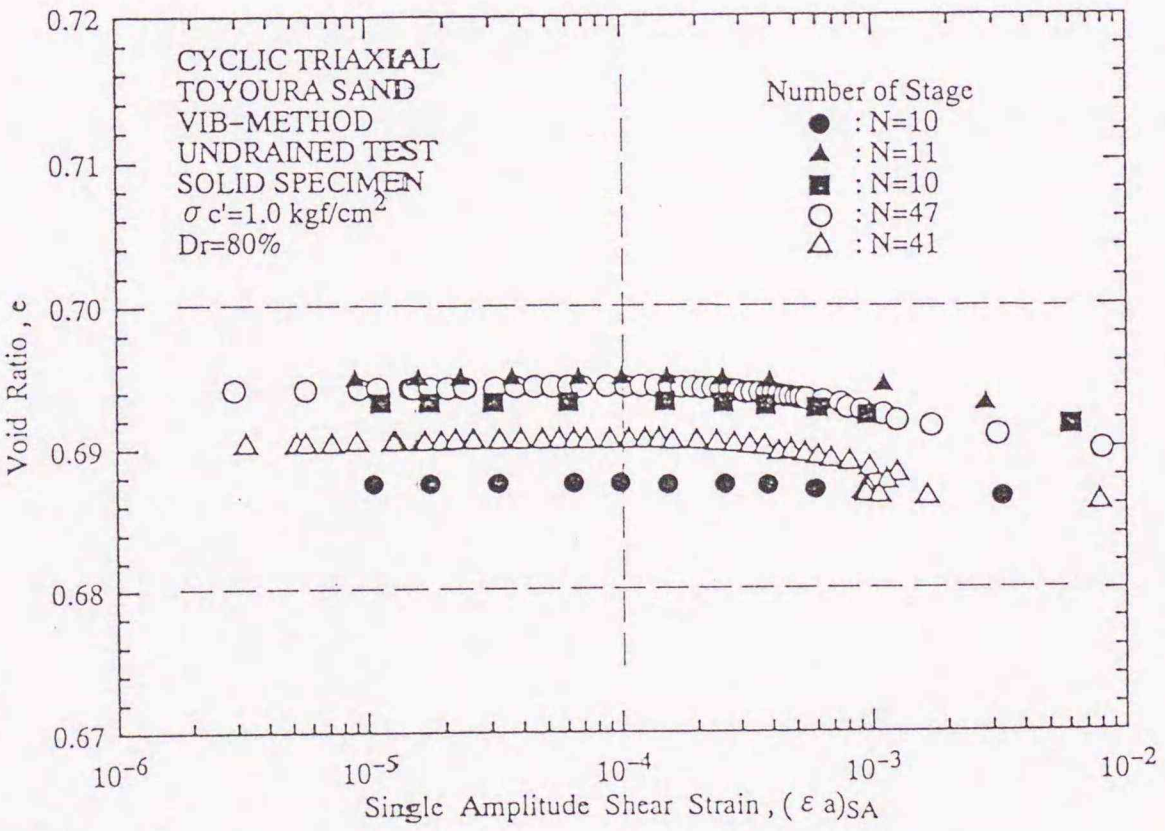


図 4 － 38　間隙比の変化に及ぼすステージ数の影響

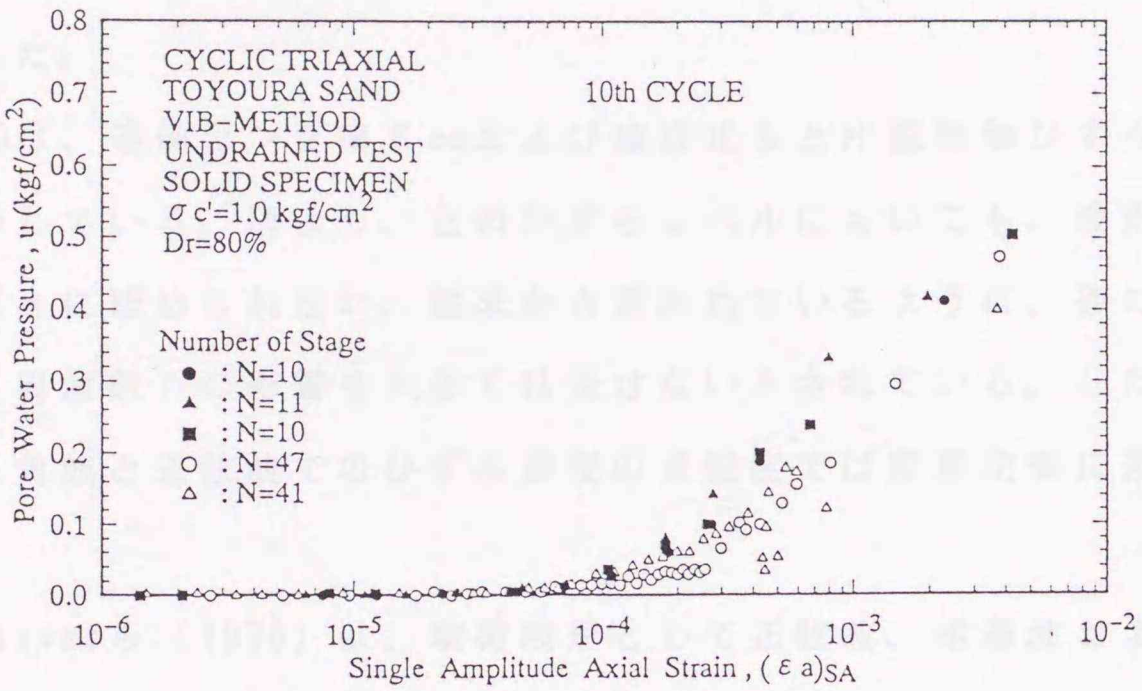


図 4 － 39　ステージ数が過剰間隙水圧に及ぼす影響

４．５．４　載荷波形の影響

三軸試験から繰返し変形定数を求める場合、一般に正弦波が用いられている。しかし、実際の地震波形を考えると正弦波よりも三角波に近い波形ではないかと考えられる。そこで、載荷波形として正弦波と三角波を用いて非排水状態で周波数０．１Ｈｚの繰返し載荷を与えた三軸試験を行い、得られるＥeqおよびｈを比較した。

図４－40は、等価ヤング率Ｅeqおよび減衰比ｈと片振幅軸ひずみ（$\varepsilon a)_{SA}$との関係を示している。図より、どのひずみレベルにおいても、波形による差はＥeqおよびｈに認められない。従来から言われているように、砂の変形定数は載荷速度（周波数）の影響を大きくは受けないとされている。したがって、今回用いた三角波と正弦波でのひずみ速度の差程度では変形定数に差は生じないと言える。

また、Silverら（1976）は、載荷波形として正弦波、矩形波および疑似矩形波を用いて液状化強度に及ぼす影響を調べ、矩形波を用いると他の波形を用いるよりも液状化強度が低下することを示した。このことは、波形によって発生する間隙水圧が異なることを意味している。しかし、図４－41に示す間隙水圧の発生状況においても波形による差は認めらず、今回試験を用いた波形（三角波と正弦波）およびひずみの範囲においては、載荷波形の影響は現れないと言える。

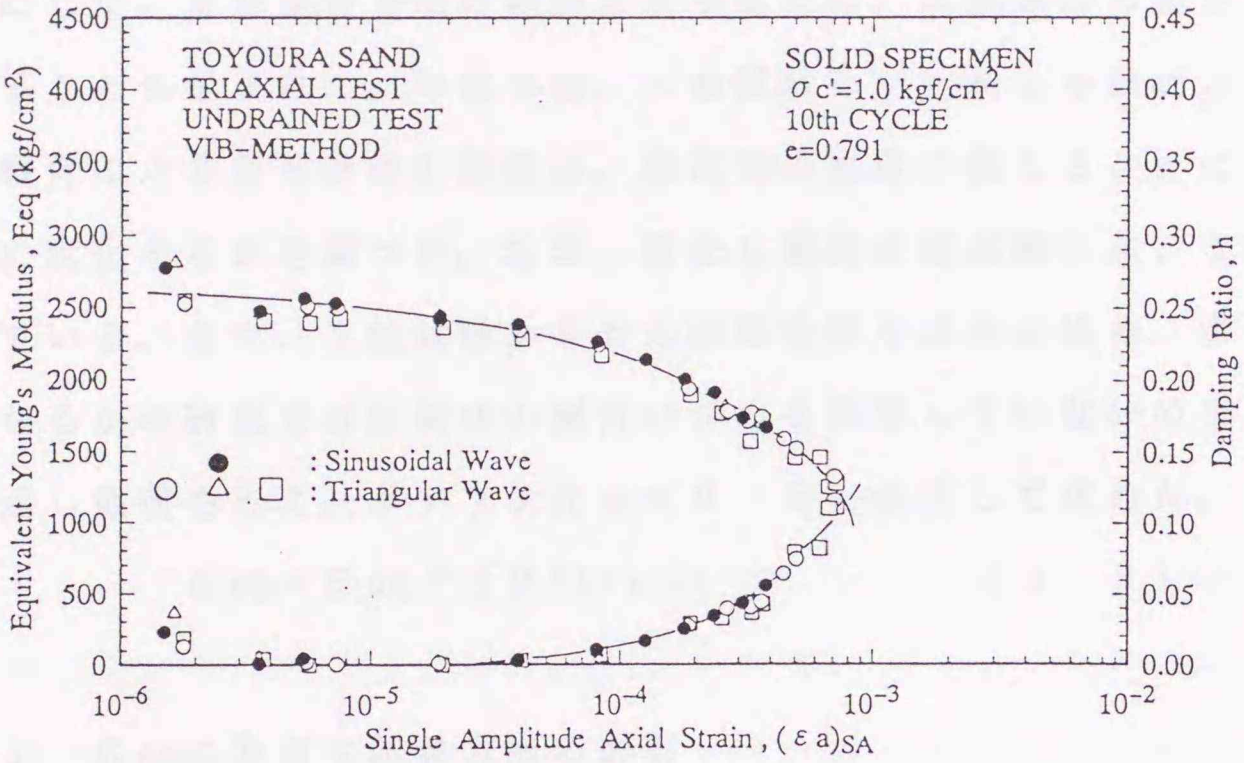


図 4 － 40　載荷波形の影響（三軸試験）

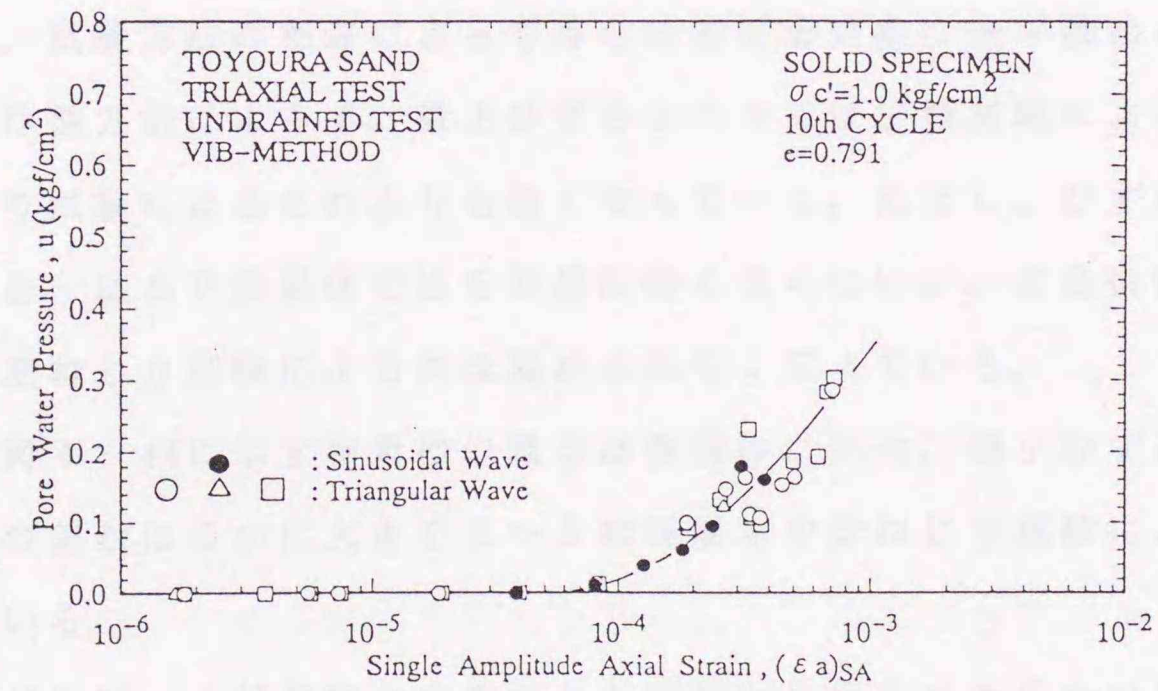


図 4 － 41　載荷波形が過剰間隙水圧に及ぼす影響

4．6　三軸試験と中空ねじり試験による比較

試験装置の種類が異なることによって、液状化強度は変化することを第３章で明らかにした。また試験方法の相違による変化は、供試体の作製方法に大きく依存することも示された。本節では、三軸試験と中空ねじり試験より得られた繰返し載荷による変形特性の関係は、供試体の構造が異なることによって、どのように変化するかを調べた。なお、繰返し載荷は両試験において非排水状態で与えている。また、三軸試験からせん断剛性率を求める場合、ポアソン比が必要となるが本研究では供試体の側方ひずみを測定していないので、非排水状態で繰返し載荷を与え、ポアソン比ν＝０．５と仮定して求めた。

$$Geq = Eeq / (2(1+\nu)) \qquad (4-5)$$

4．6．1　Geqに及ぼす試験方法の影響

図４－42，43は、ＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥ法で作製した豊浦供試体に対して、三軸試験と中空ねじり試験による等価せん断剛性率Geqおよび減衰比ｈと片振幅せん断ひずみ$(\gamma)_{SA}$の関係をＤｒ＝８０，６０％について示したものである。

図より、試験方法の相違によって得られる変形定数に差が認められ、Geqは供試体の作製方法によらず、微小ひずみレベルでは三軸試験によるGeqの方が中空ねじり試験によるそれよりも低くなっている。ただし、ひずみレベルが大きくなると、ＭＳＰ供試体ではその差は無くならないが、ＣＥ供試体では三軸試験と中空ねじり試験による差は認められなくなっている。

一方、図４－44に示す相馬砂の場合は豊浦砂に比べ、微小ひずみレベルでの変形係数の差がはるかに大きく２～３割程度も中空ねじり試験によるGeqが高くなっている。

図４－45には、三軸試験と中空ねじり試験から得られたGeqの比を各供試体作製方法に対して比較したものである。どのひずみレベルにおいても、三軸試験よりも中空ねじり試験によるGeqが高くなっている。また、供試体作製方法の相違による差は、微小ひずみレベルではＣＥ供試体の差が最も大きくなっているが、ひずみレベルが大きくなると逆にＭＳＰ、ＶＩＢ、ＣＥの順になり三

軸とねじり試験による差はひずみレベルによって異なることが分かる。一方、図４－46に示す相馬砂と豊浦砂を比較した場合は、相馬砂の方が豊浦砂よりも微小ひずみレベルで２倍程度、試験方法の相違による差が生じている。

このように、三軸試験で得られた変形係数が低くなる理由として、供試体端面におけるベッディングエラーの影響が考えられる。三軸試験では供試体の軸変位を測定するためにキャップの変位を非接触変位計を用いて測定している。龍岡ら（1992）は供試体の局所変位からＥeqを求めた場合、キャップの変位から求めた場合よりも大きくなることを指摘している。そこで、ベッディングエラーの影響を調べるために、図４－47に示すように供試体の側面に直接ターゲット（質量２ｇ）を瞬間接着剤で張り付け、その変位を非接触変位計を用いて測定し、キャップの変位から求めたＥeqと比較した。試験は、豊浦砂と相馬砂の乾燥試料を用いて、供試体に０．８kgf/cm²の負圧を与え、排気状態で行った。

図４－48に示すように豊浦砂の場合は、局所変位から求めた変形係数の方がやや高くなっている。一方、豊浦砂（D_{50}＝0.18mm）よりも粒径が大きな相馬砂（D_{50}＝0.73mm）では明らかに局所変位による変形係数が大きくなっており、ベッディングエラーの影響は粒径が大きいほど大きいことが分かる。

また豊浦砂の場合、ＣＥ供試体では他の供試体作製方法よりも試験方法の差が大きくなったが、これは、ＣＥ供試体は凍結供試体であるため、供試体端面の粗さやキャップとの平行性により非凍結供試体よりもベッディングエラーの影響大きくなったものと考えられる。したがって、図４－42～44に認められた三軸試験と中空ねじり試験による変形係数の相違の１つの要因はベッディングエラーの影響によるものと思われる。ただし、ベッディングエラーの影響はひずみレベルが大きくなると消滅していることと、三軸試験と中空ねじり試験結果の相違は、図４－48に示されたベッディングエラーの影響以上の相違が認められることから、三軸試験と中空ねじり試験による変形特性の相違は、その他の要因（例えば、中間主応力や平均主応力の相違、ポアソン比０．５の妥当性等）の影響も考えられる。

一方、ひずみレベルが大きなところで、両試験によるＧeqの関係が供試体作製方法によってやや異なるのは、繰返し載荷によって発生する間隙水圧が作製方法によって異なるためと考えられる。図４－49～51には、各供試体作製方法

について、繰返し載荷１０サイクル終了時での残留間隙水圧を示している。ＭＳＰ供試体では、やや三軸試験による間隙水圧の発生量が大きく、ＣＥ供試体では逆に中空ねじり試験による発生量が高くなっている。ＶＩＢ供試体では、三軸試験と中空ねじり試験でほぼ等しくなっている。したがって、ひずみレベルが大きなところでの三軸試験と中空ねじり試験での１０サイクル目での有効拘束圧の関係は、供試体作製方法によって異なるため、図４－45に認められたひずみレベルが大きいところで、供試体作製方法の違いによってやや差が認められたと考えられる。

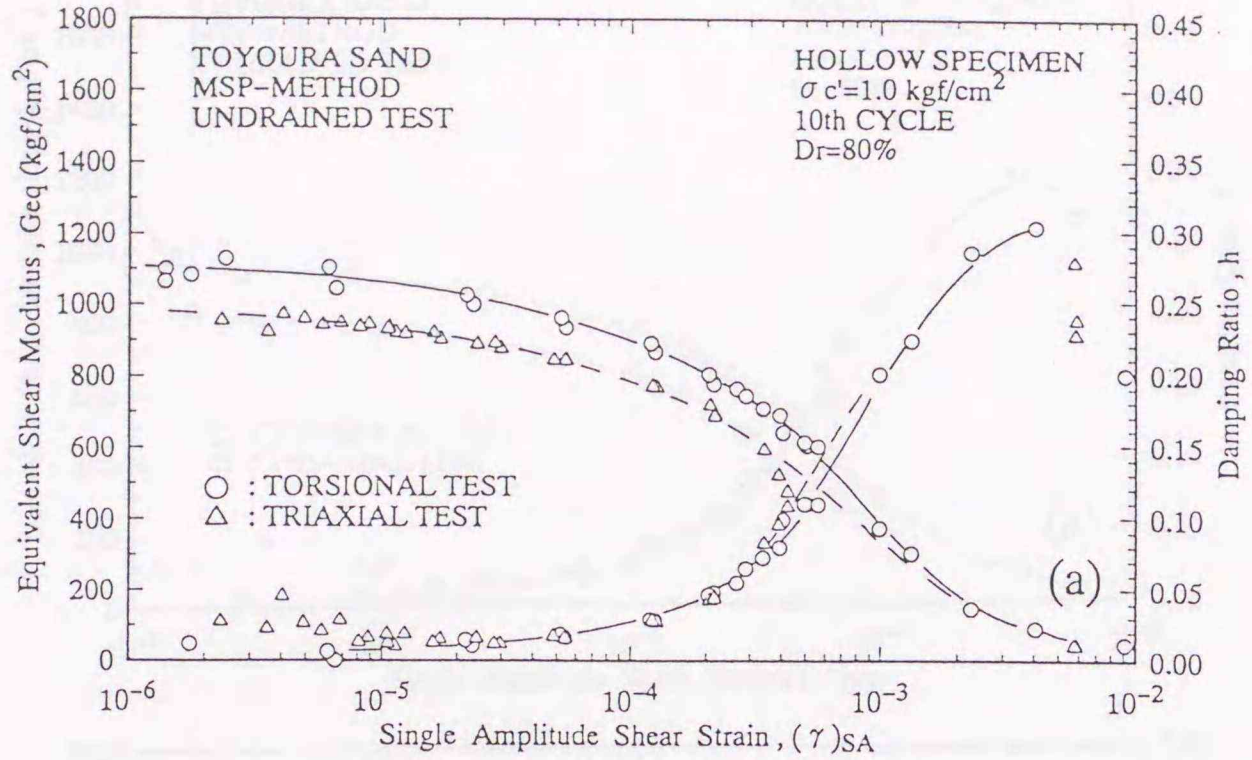


図４－42　三軸試験とねじり試験の比較（豊浦砂・Ｄｒ＝８０％）
(a)ＭＳＰ供試体 (b)ＶＩＢ供試体 (c)ＣＥ供試体

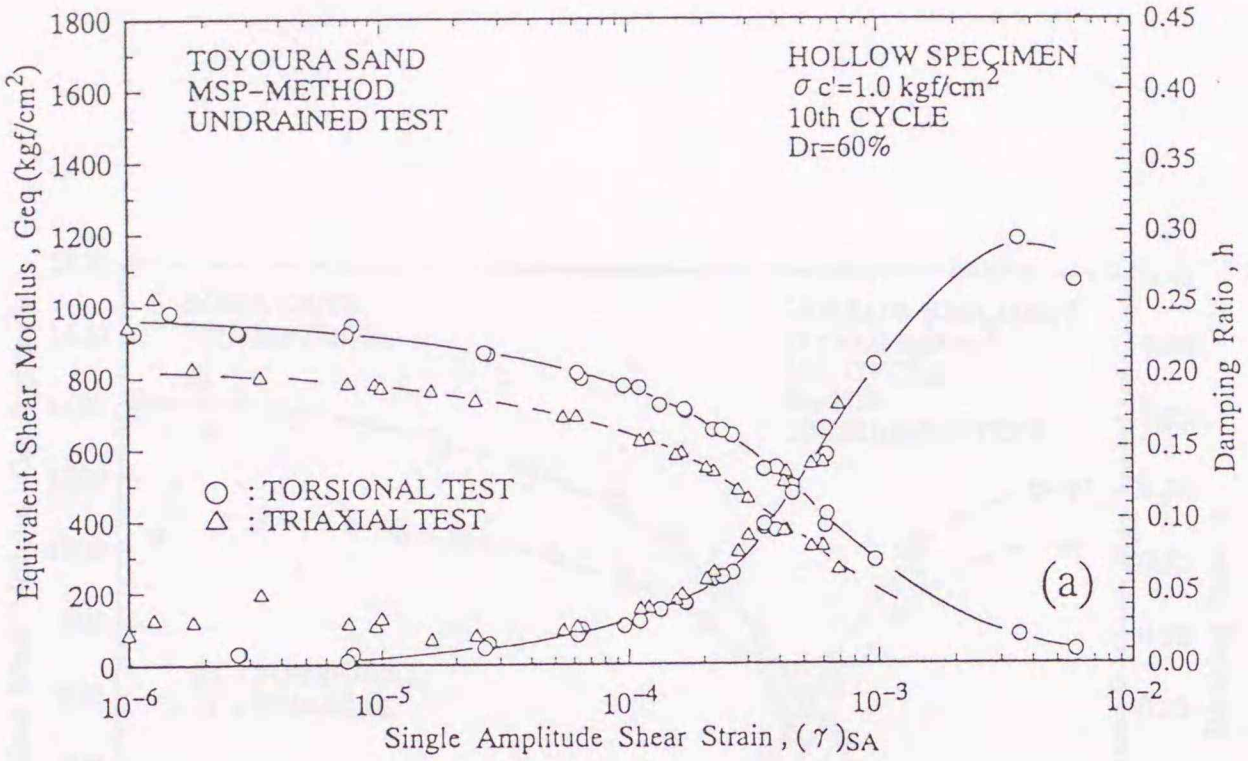


図４－43　三軸試験とねじり試験の比較（豊浦砂・Ｄｒ＝６０％）
(a)ＭＳＰ供試体 (b)ＶＩＢ供試体 (c)ＣＥ供試体

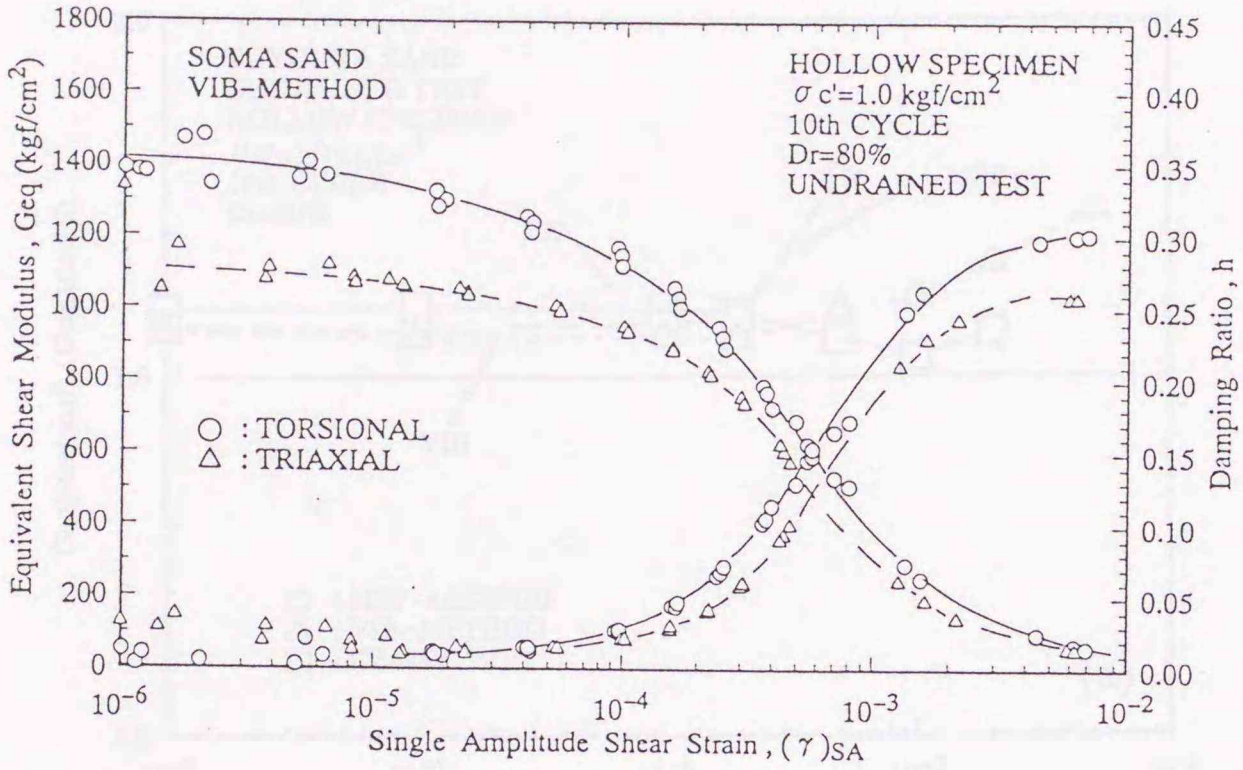
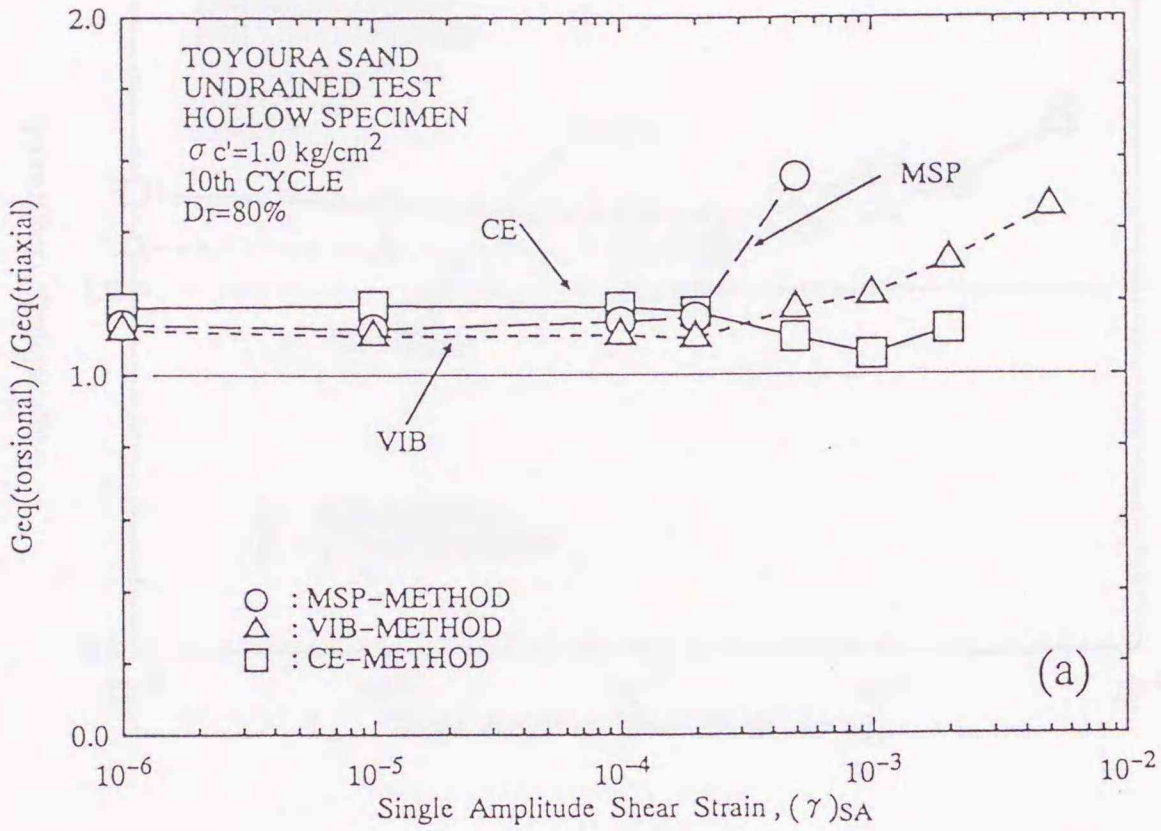


図４－44　三軸試験とねじり試験の比較（相馬砂・ＶＩＢ供試体）



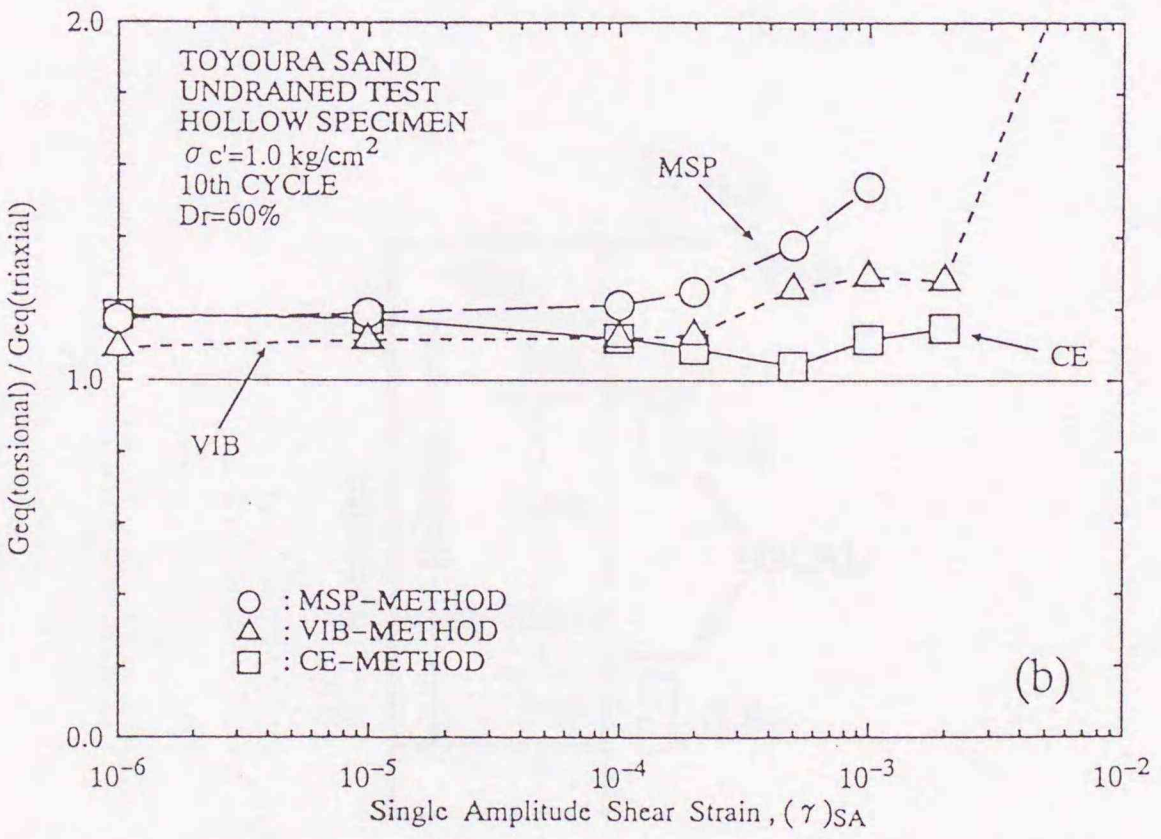


図 4 － 45　三軸試験と中空ねじり試験によるＧeqの比較（豊浦砂）
(a)Ｄｒ＝８０％　(b)Ｄｒ＝６０％

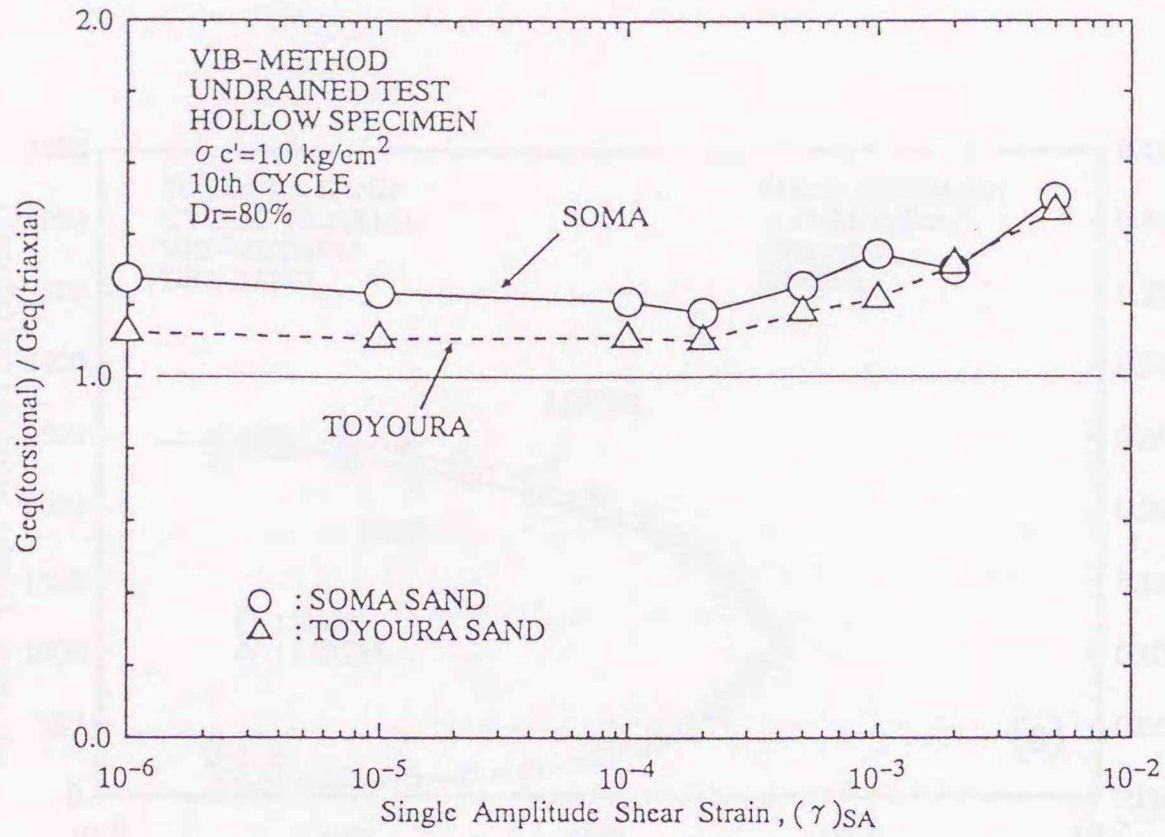


図４－46　三軸試験と中空ねじり試験によるＧeqの比較（ＶＩＢ供試体）

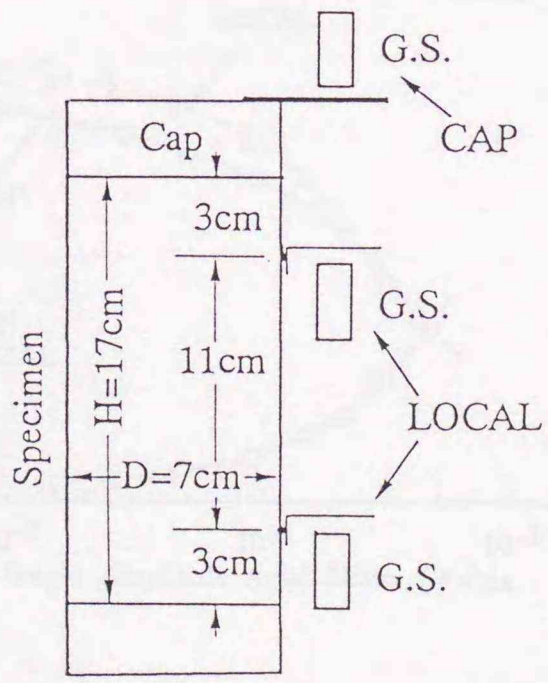
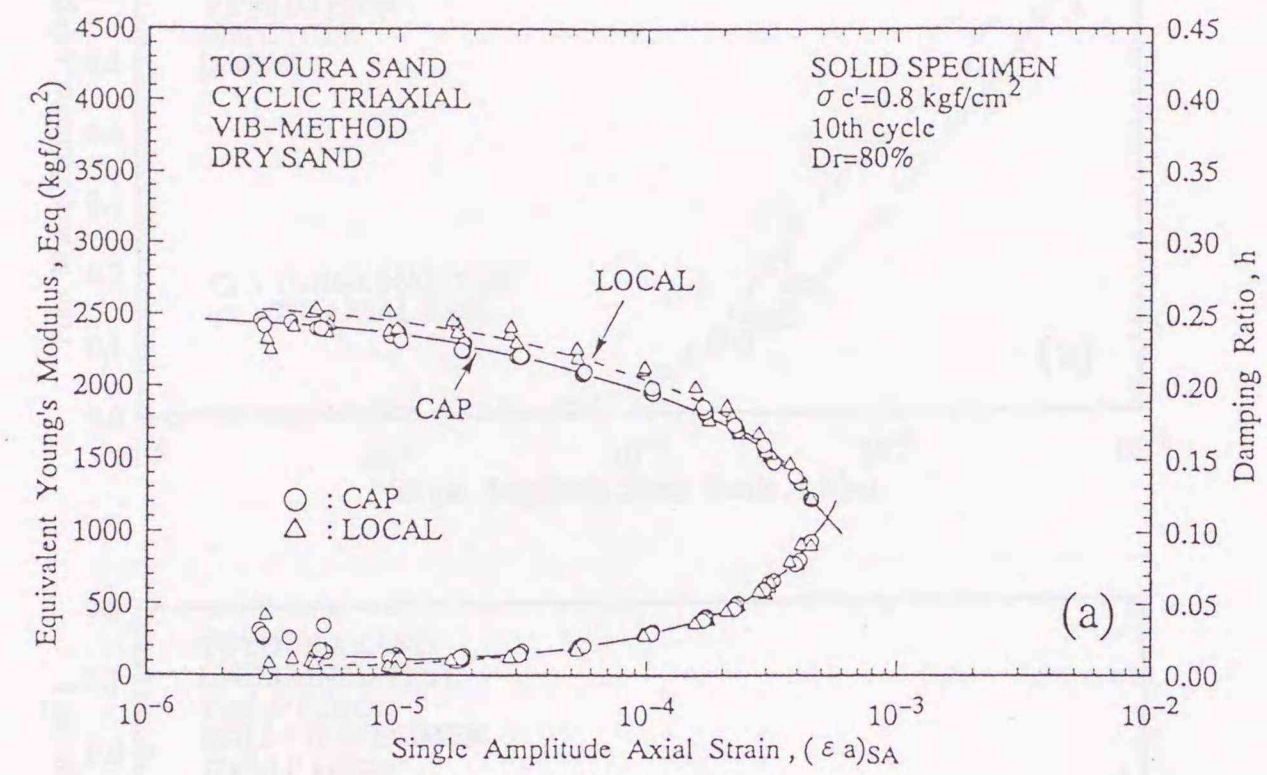


図４－47　局所変位の測定方法



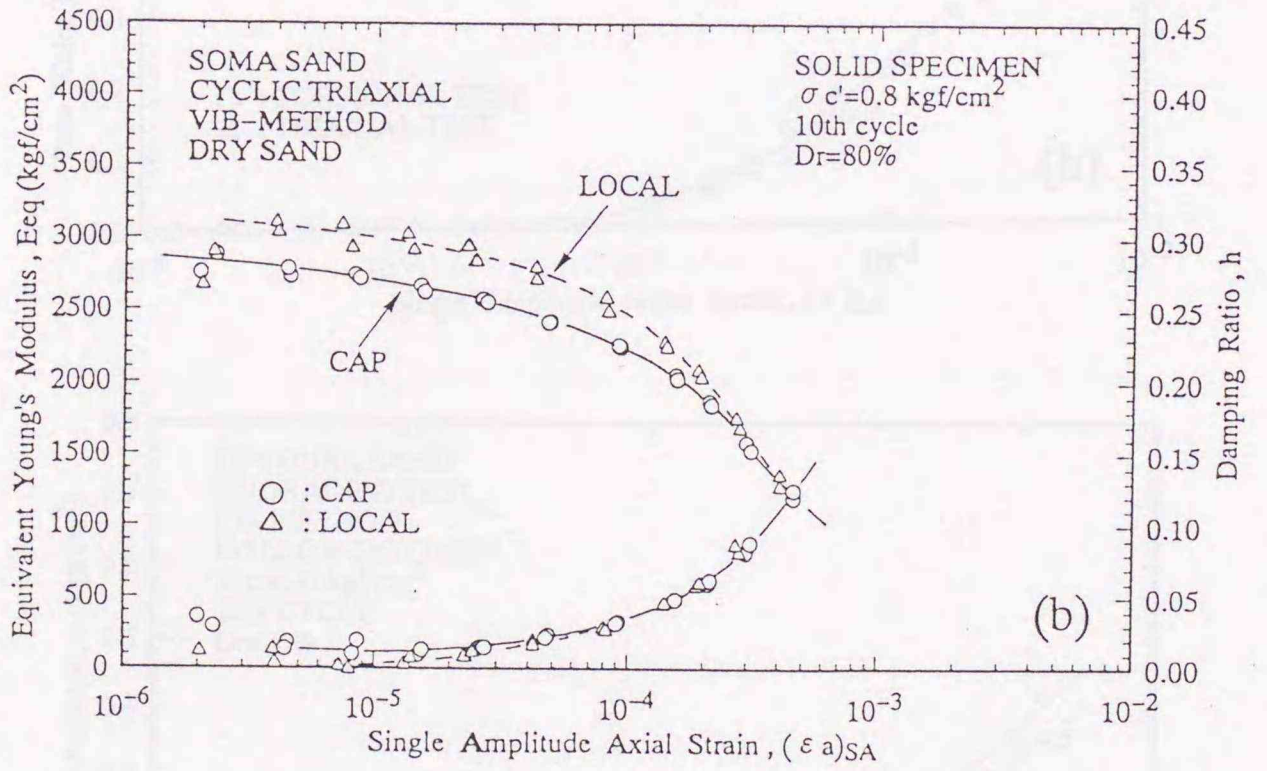
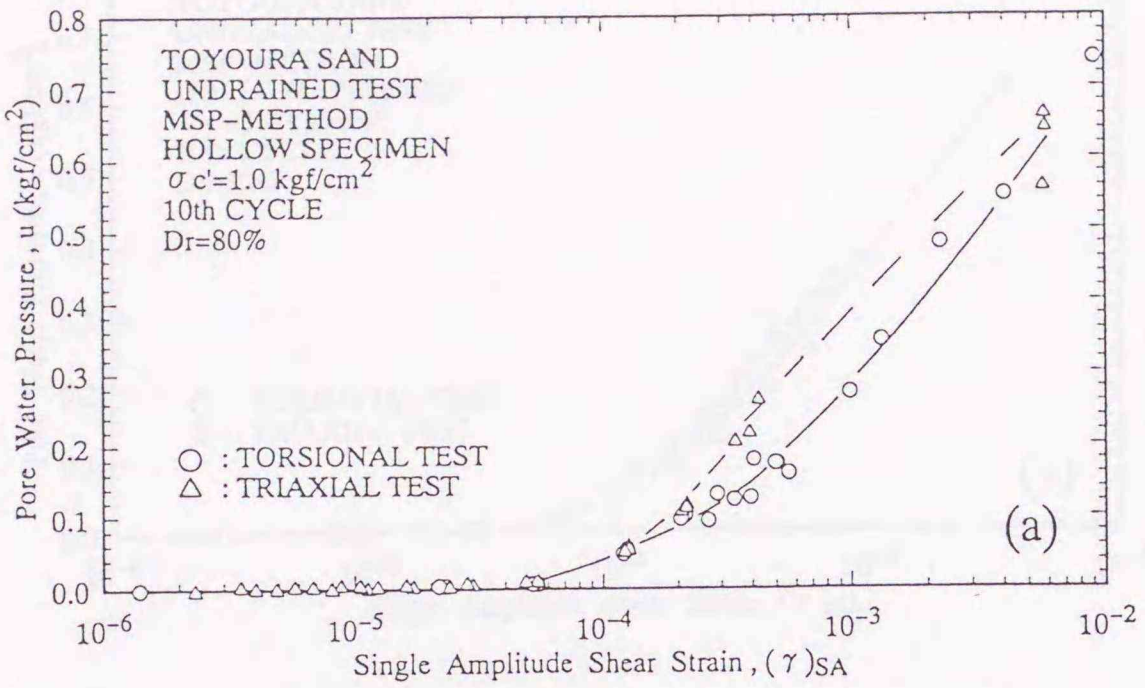
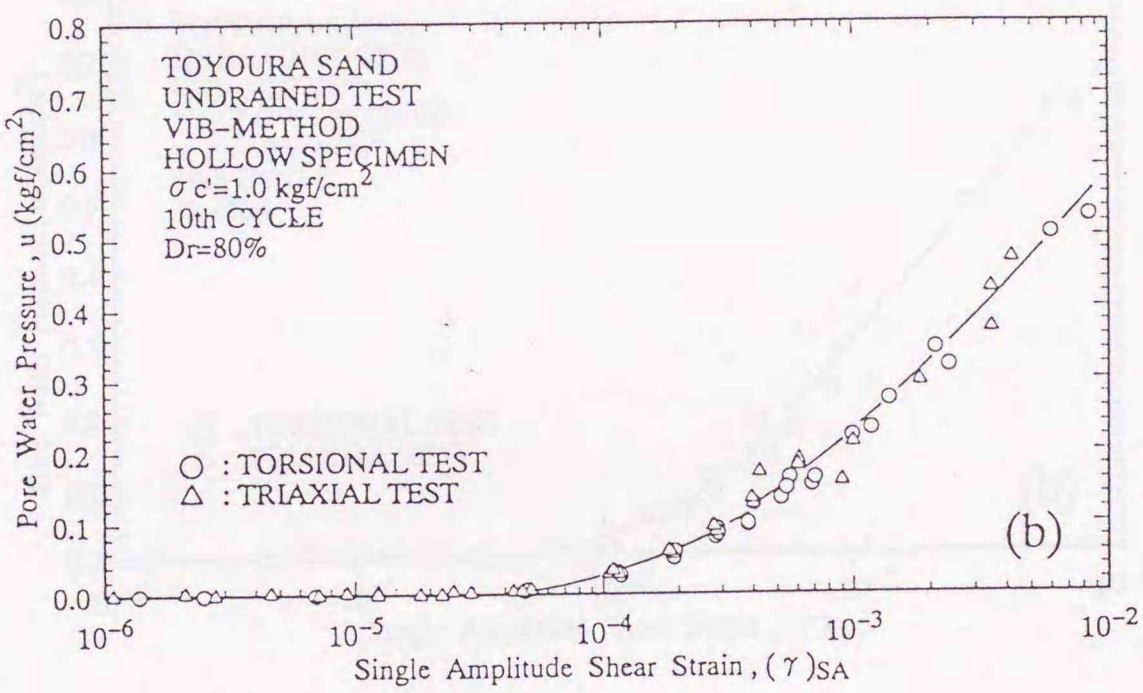


図 4 － 48　ベッディングエラーの影響 (a)豊浦砂 (b)相馬砂





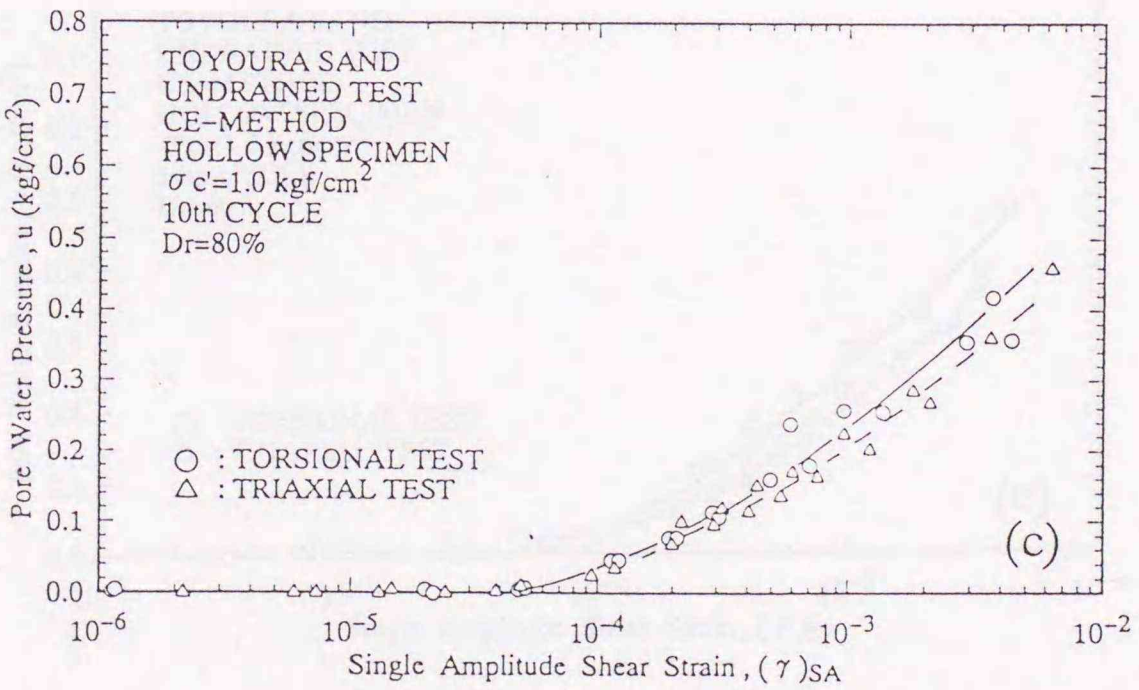


図４－49　三軸試験と中空ねじり試験での間隙水圧の比較（豊浦砂・Dr=80%）
(a)ＭＳＰ供試体 (b)ＶＩＢ供試体 (c)ＣＥ供試体

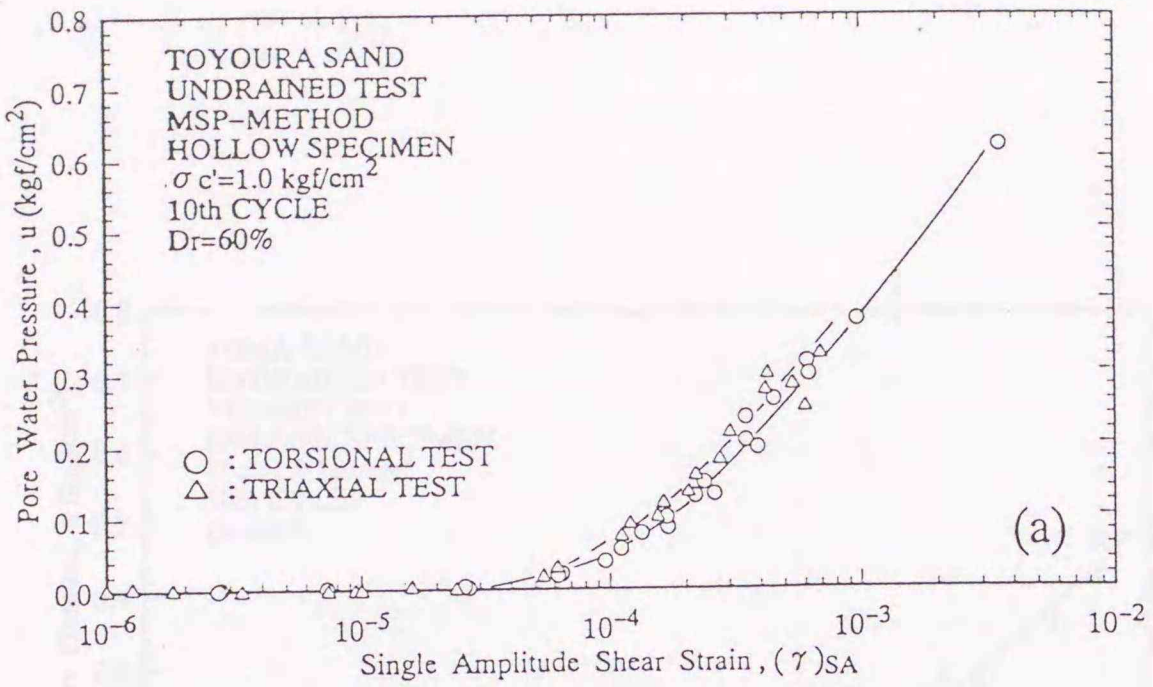


図４－50　三軸試験と中空ねじり試験での間隙水圧の比較（豊浦砂・Dr=60%）
(a)ＭＳＰ供試体 (b)ＶＩＢ供試体 (c)ＣＥ供試体

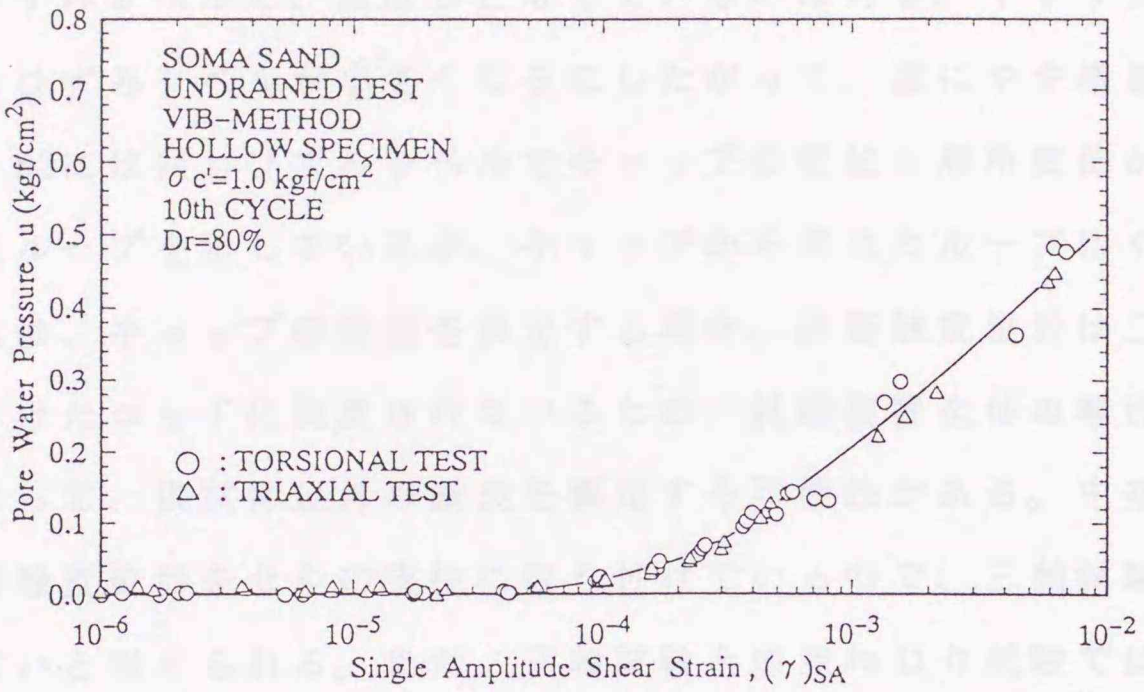


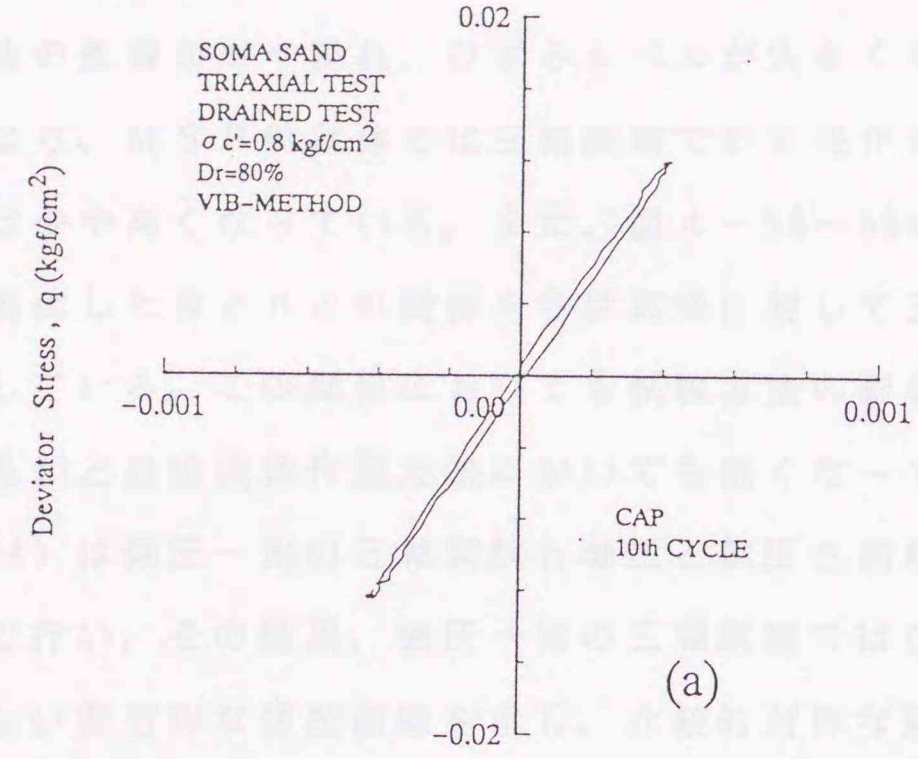
図４－51　三軸試験と中空ねじり試験での間隙水圧の比較（相馬砂）

4．6．2　hに及ぼす試験方法の影響

次に、減衰比hに及ぼす試験方法の影響を見ると、微小なひずみでは三軸試験と中空ねじり試験によるhに大きな差は認められないが、やや、三軸試験でのhが高くなっている。これは、図4－48に示したように、局所変位から求めたhは微小ひずみレベルで、ほぼ0となっているのに対し、キャップの変位から求めたhはひずみレベルが小さくなるにしたがって、逆にやや増加している。また、図4－52には同じひずみレベルでキャップの変位と局所変位から求めたヒステリシスループを示しているが、キャップから求めたループはやや広がっている。これは、キャップの変位を測定する場合、非接触変位計は三軸セルの上盤に取り付けたロッドに設置されているため、試験装置全体の剛性や軸受けの摩擦等によって、供試体以外の減衰を測定する可能性がある。中空ねじり試験では、非接触変位計をセルの支柱に取り付けているので、三軸試験よりもその影響は少ないと考えられる。また、三軸試験と中空ねじり試験では同じひずみレベルでの測定精度が中空ねじり試験の方がやや高い。このため微小ひずみレベルで三軸試験でのhがやや高くなったと考えられる。

一方、ひずみレベルが大きなところでは、ＭＳＰ供試体ではやや三軸試験によるhが高く、ＣＥ供試体では逆に低くなっている。このように、試験方法によってhに差が認められるのは以下に述べるような2つの因子が考えられる。

図4－49～51に示したように、ひずみレベルが大きくなると繰返し載荷にともなう三軸試験と中空ねじり試験での間隙水圧の発生量が供試体作製方法によって異なっている。したがって、供試体作製方法によって三軸試験と中空ねじり試験での有効拘束圧の大小関係が異なるため、hに供試体作製方法による差が生じた1つの要因である。また、三軸試験では繰返し応力が大きくなると三軸圧縮条件と伸張条件での変形特性が異なるため、ヒステリシスループが対称とならずhが低下することが考えられる。このような2つの因子が、三軸試験と中空ねじり試験でのhの差に現れた理由であると考えられる。



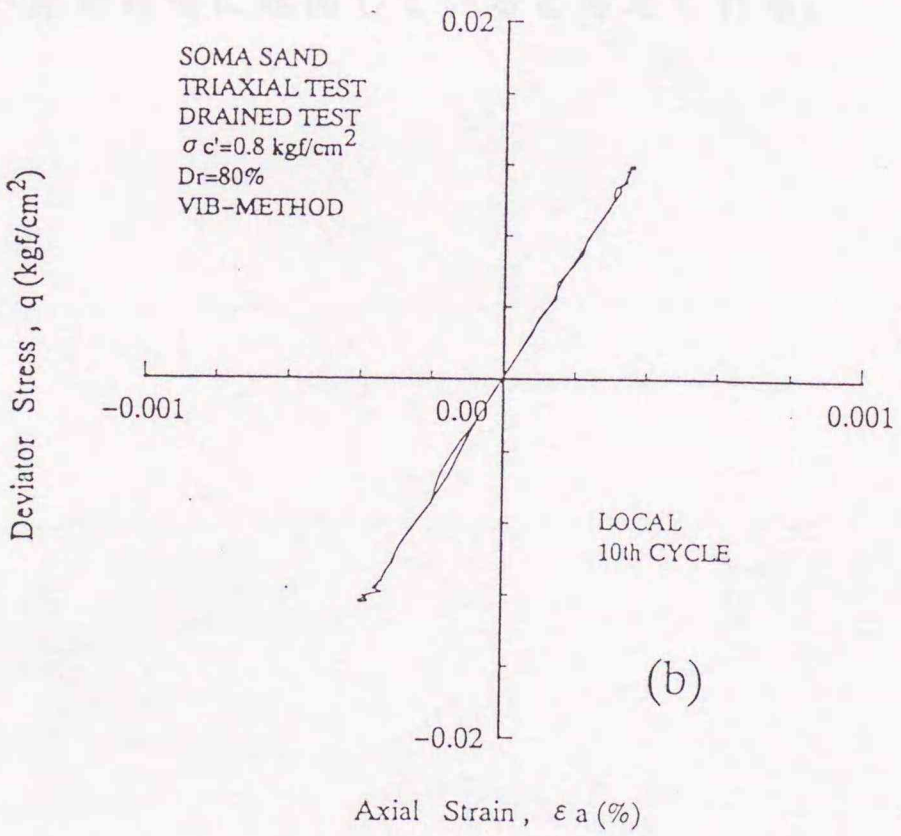
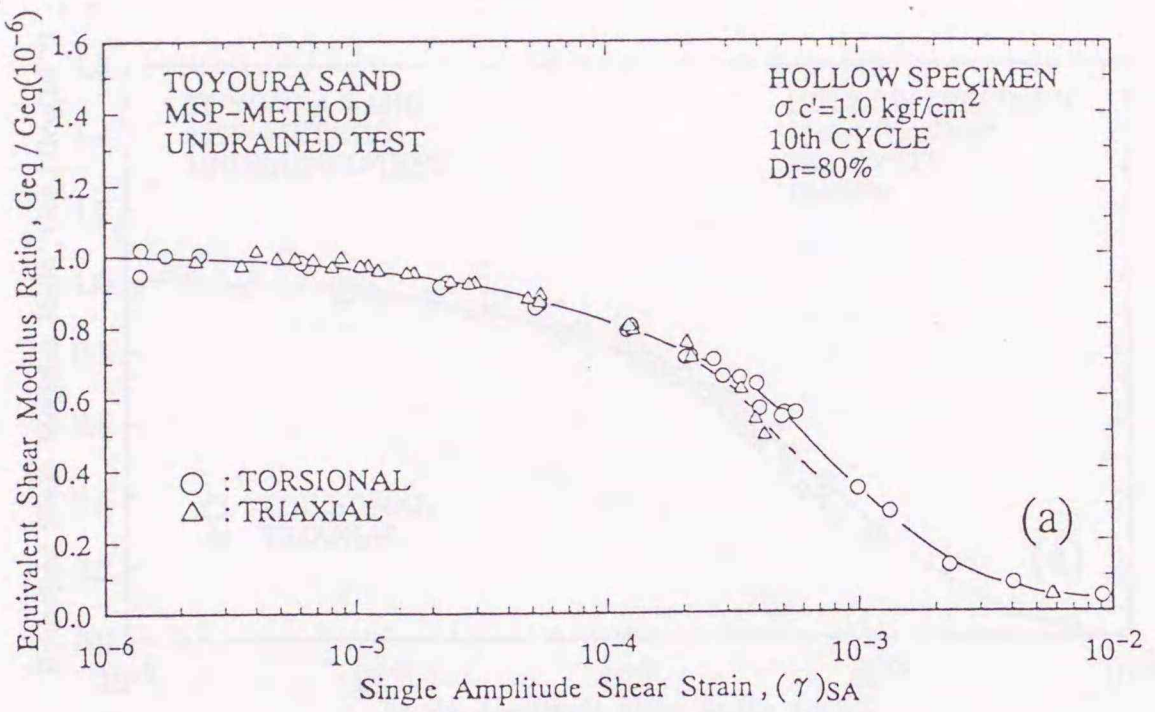


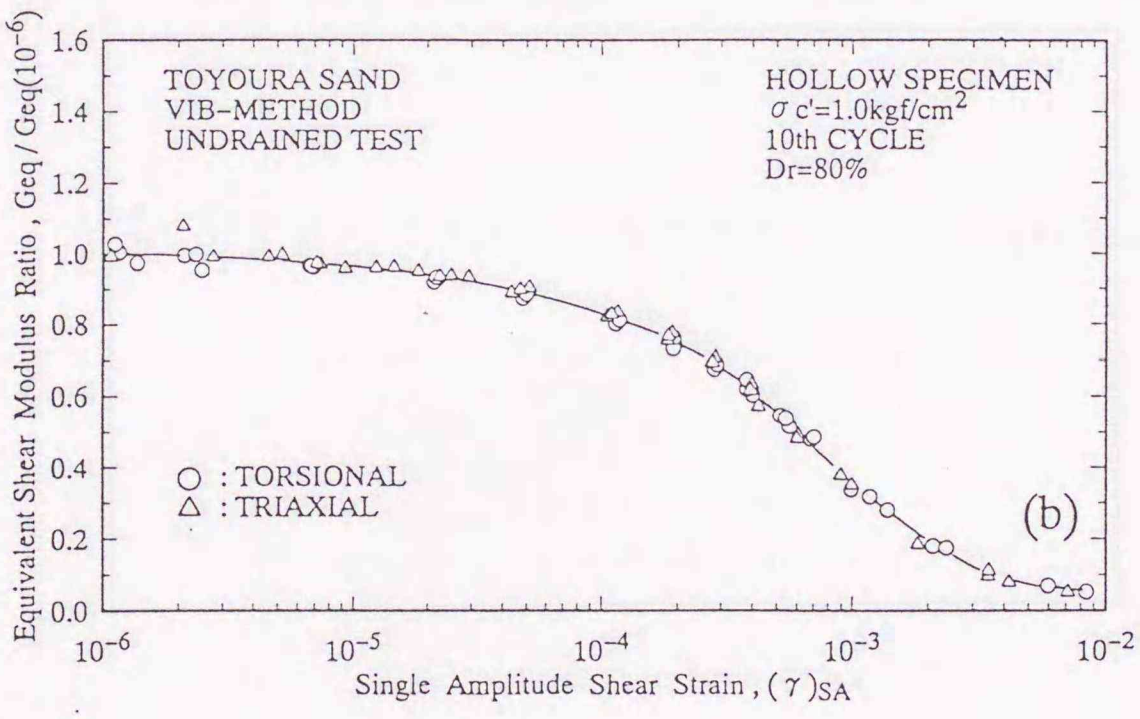
図４－52　キャップの変位と局所変位を用いたヒステリシスループの比較
(a)キャップの変位　(b)局所変位

4．6．3　正規化Geqに及ぼす試験方法の影響

図4－53～55は、Geqを10^{-6}でのGeqで正規化した値と$(\gamma)_{SA}$との関係を各供試体に対して三軸試験と中空ねじり試験で比較している。この関係においても試験方法の影響がやや現れ、ひずみレベルが大きくなると供試体作製方法によって異なり、MSP供試体では三軸試験での正規化Geqがやや低くなり、CE供試体ではやや高くなっている。また、図4－56～58には、Geqを10^{-6}でのGeqで正規化した値とhとの関係を各供試体に対して三軸試験と中空ねじり試験で比較している。この関係においても試験方法の影響がやや現れ、三軸試験による関係がどの供試体作製方法においても低くなっている。

榎並ら（1984）は側圧一定の三軸試験と軸圧と側圧を同時に変動する三軸試験を排気状態で行い、その結果、側圧一定の三軸試験ではひずみレベルが大きくなると、著しい非対称な履歴曲線を示し、比較的対称な履歴曲線を示す軸圧と側圧を同時に変動する試験よりもG/Gmax～h関係は低くなることを示している。したがって、G/Gmax～h関係が三軸試験と中空ねじり試験で異なる要因は履歴曲線の非対称性に起因していると考えられる。





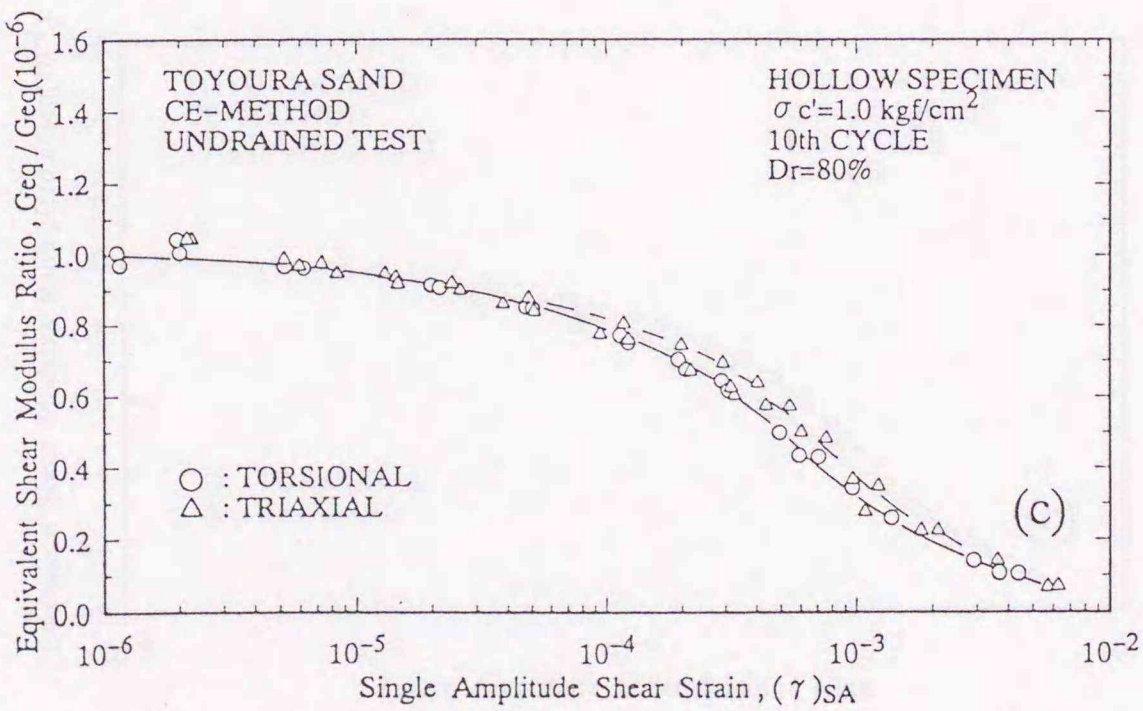


図４－53　正規化したＧeqに及ぼす試験方法の影響（豊浦砂・Ｄｒ＝８０％）
(a)ＭＳＰ供試体 (b)ＶＩＢ供試体 (c)ＣＥ供試体

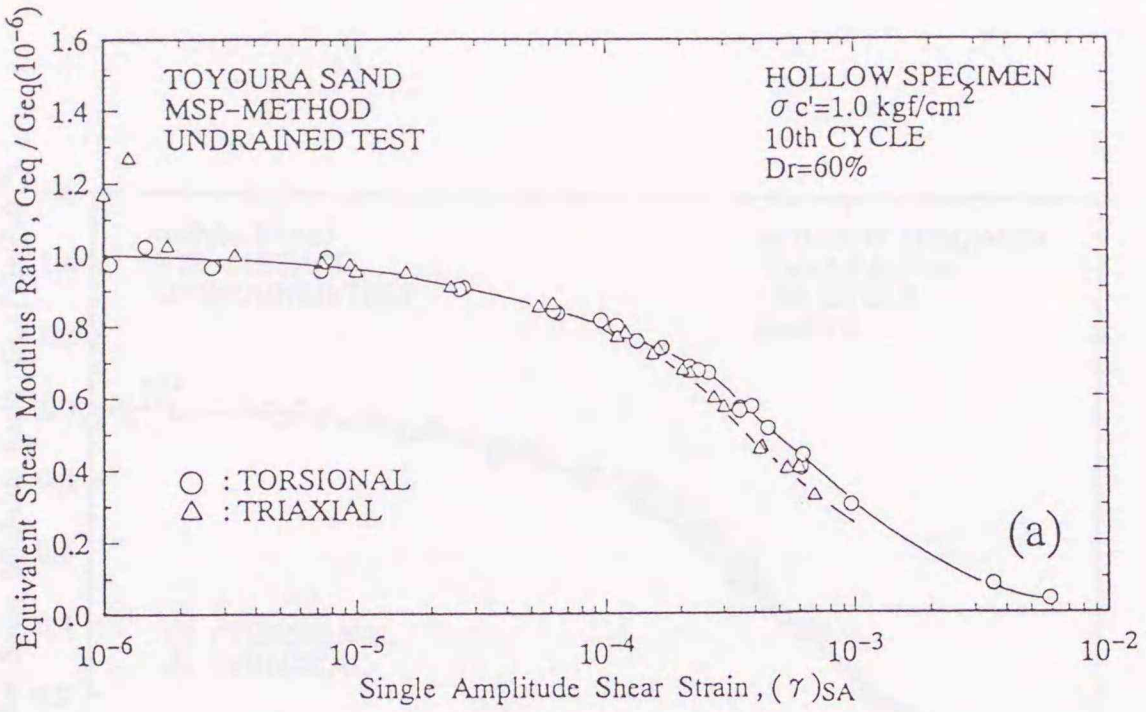


図 4 － 54　正規化したＧeqに及ぼす試験方法の影響（豊浦砂・Ｄｒ＝６０％）
(a)ＭＳＰ供試体 (b)ＶＩＢ供試体 (c)ＣＥ供試体

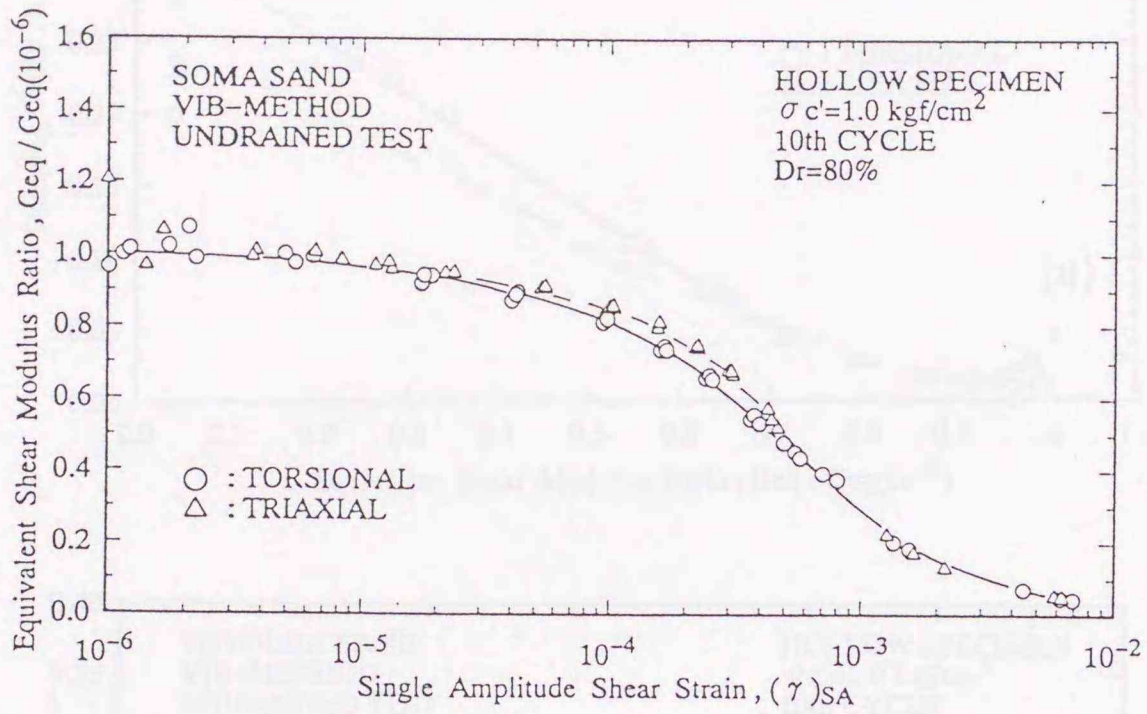


図４－55　正規化したＧeqに及ぼす試験方法の影響（相馬砂・ＶＩＢ供試体）

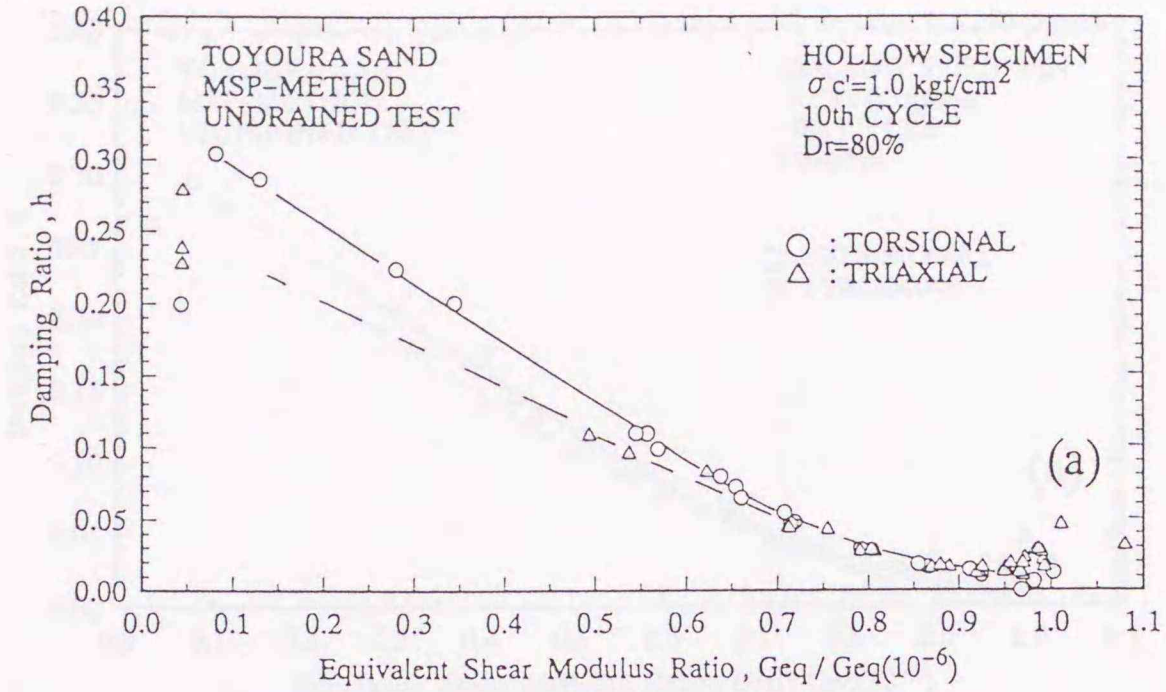


図４－56　Ｇeq/Ｇeq(10⁻⁶)～ｈ関係に及ぼす試験方法の影響(豊浦砂・Dr=80%)
(a)ＭＳＰ供試体 (b)ＶＩＢ供試体 (c)ＣＥ供試体

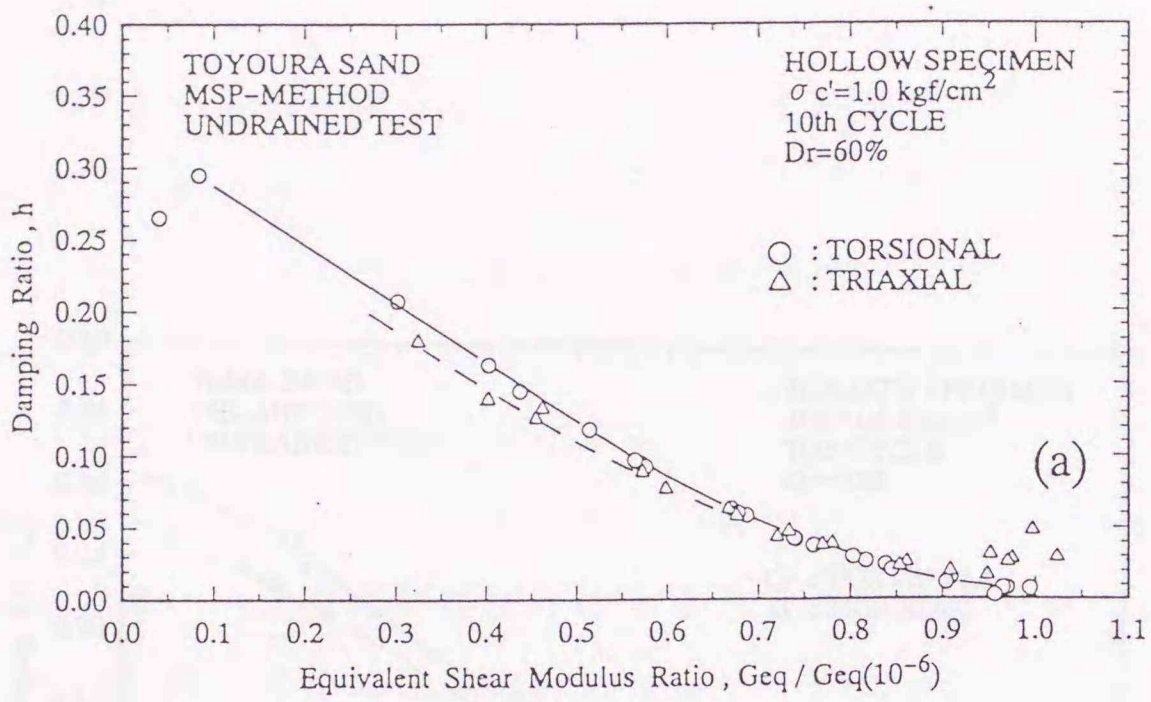


図４－57　Ｇeq/Ｇeq(10⁻⁶)～ｈ関係に及ぼす試験方法の影響(豊浦砂・Dr=60%)
(a)ＭＳＰ供試体 (b)ＶＩＢ供試体 (c)ＣＥ供試体

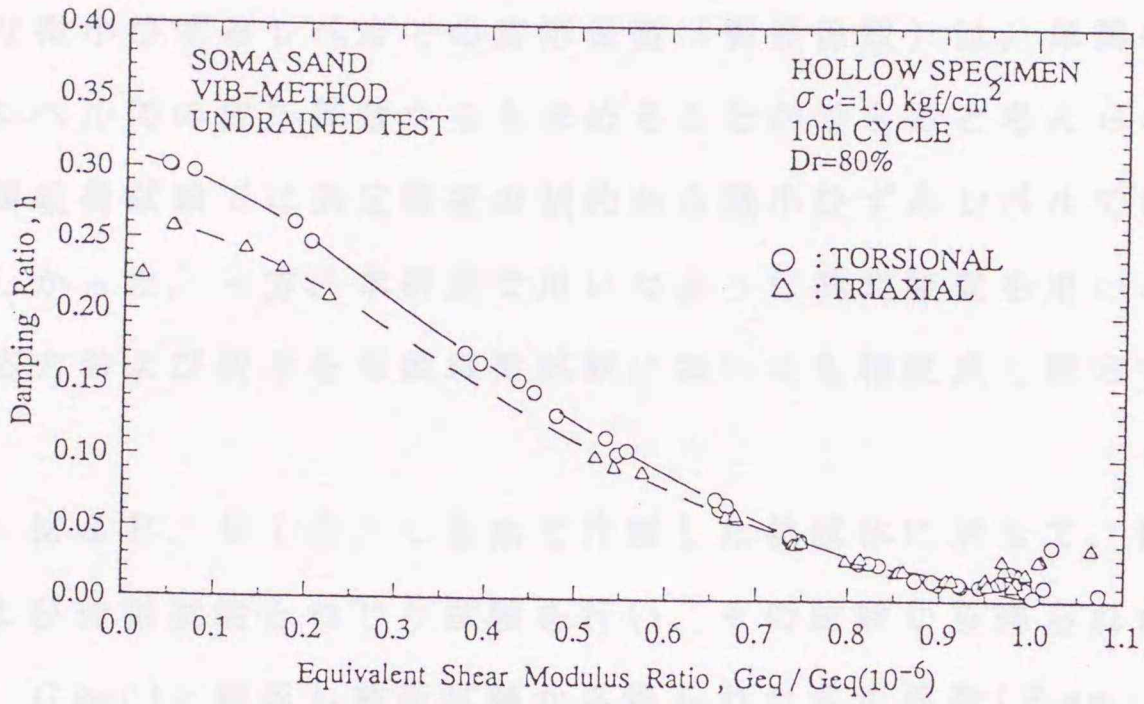


図４－58　Ｇeq/Ｇeq(10⁻⁶)～ｈ関係に及ぼす試験方法の影響
（相馬砂・ＶＩＢ供試体）

4．7　単調載荷試験と繰返し載荷試験の比較

これまで、繰返し載荷試験から変形係数のひずみ依存性を調べた結果、一つの結論として、試験方法や供試体作製方法によらず、微小ひずみレベルにおいては減衰比はほとんど0に等しく弾性的な挙動を示すことが明らかにされた。このような微小ひずみレベルでの変形係数（弾性係数）は、単調載荷試験の微小ひずみレベルでの変形係数からも求めることができると考えられる。しかし、通常の単調載荷試験では測定精度の制約から微小ひずみレベルでの変形係数の測定は難しかった。一方、本研究で用いたような測定装置を用いることによって微小な応力および変形を単調載荷試験においても精度良く測定することが可能である。

そこで、ＭＳＰ，ＶＩＢ，ＣＥ法で作製した供試体に対して、側圧一定の三軸圧縮および伸張試験とねじり試験を行い、その試験から得られた割線変形係数(Ｅsec，Ｇsec)と繰返し載荷試験から得られた変形係数(Ｅeq，Ｇeq)とを比較した（図４－59参照）。

図４－60は三軸試験から得られた結果を、図４－61はねじり試験から得られた変形係数を単調載荷試験と繰返し載荷試験でそれぞれの供試体作製方法について示している。図より三軸試験においてもねじり試験においても、微小ひずみで得られる変形係数は、繰返し載荷試験から得られる変形係数にどの供試体作製方法においてもほぼ一致している。また、三軸試験では圧縮試験と伸張試験での微小ひずみレベルの変形係数はほぼ一致しており、微小ひずみレベルでの変形係数は応力条件に依らないことが分かる。

ただし、単調載荷試験で得られる変形係数は、繰返し載荷試験によって得られる変形係数よりも変形係数の低下するひずみレベルが小さく、単調載荷試験での弾性範囲は繰返し載荷試験よりも小さいことが分かる。このことは、繰返し載荷試験では単調載荷試験よりも繰返し載荷によって硬化が生じていると言える。これは、図４－62に示した単調載荷試験と繰返し載荷試験で得られた応力とひずみの関係から、繰返し載荷によって求めた応力－ひずみ関係は単調載荷時の応力－ひずみ曲線よりも上方に位置していることからも分かる。このことは、単調載荷試験での応力－ひずみ関係と繰返し載荷試験での骨格曲線は一

致しないことも言える。

また、ひずみレベルが大きなところでは、変形係数のひずみ依存性は三軸圧縮試験と伸張試験で大きく異なっている。これは、供試体の作製方法の相違による変形特性の相違と、三軸試験は側圧一定のもとで行っているため、圧縮条件と伸張条件で平均主応力が異なることによると考えられる。

図４－63には単調載荷試験で得られた変形係数を各供試体作製方法で比較している。また、図４-64,65では種々のひずみの範囲での応力－ひずみ曲線を示している。これらの図から、例え弾性範囲であっても、供試体作製方法の相違によってその弾性係数は異なるとともに、特に三軸試験においてはその後の変形係数もひずみレベルによって各供試体作製方法間の大小関係も変化することも分かる。このことから、微小ひずみレベルでの変形係数から大きなひずみレベルでの変形係数や破壊強度を推定することは必ずしも正確ではないと言える。

以上のことから、測定精度を向上させることによって単調載荷試験から十分信頼できる微小ひずみレベルでの変形係数を求めることができる。また、従来は１つの供試体から求めることのできなかった微小ひずみの変形係数と破壊強度を、単調載荷試験のみを行うことによって求めることができることも示している。

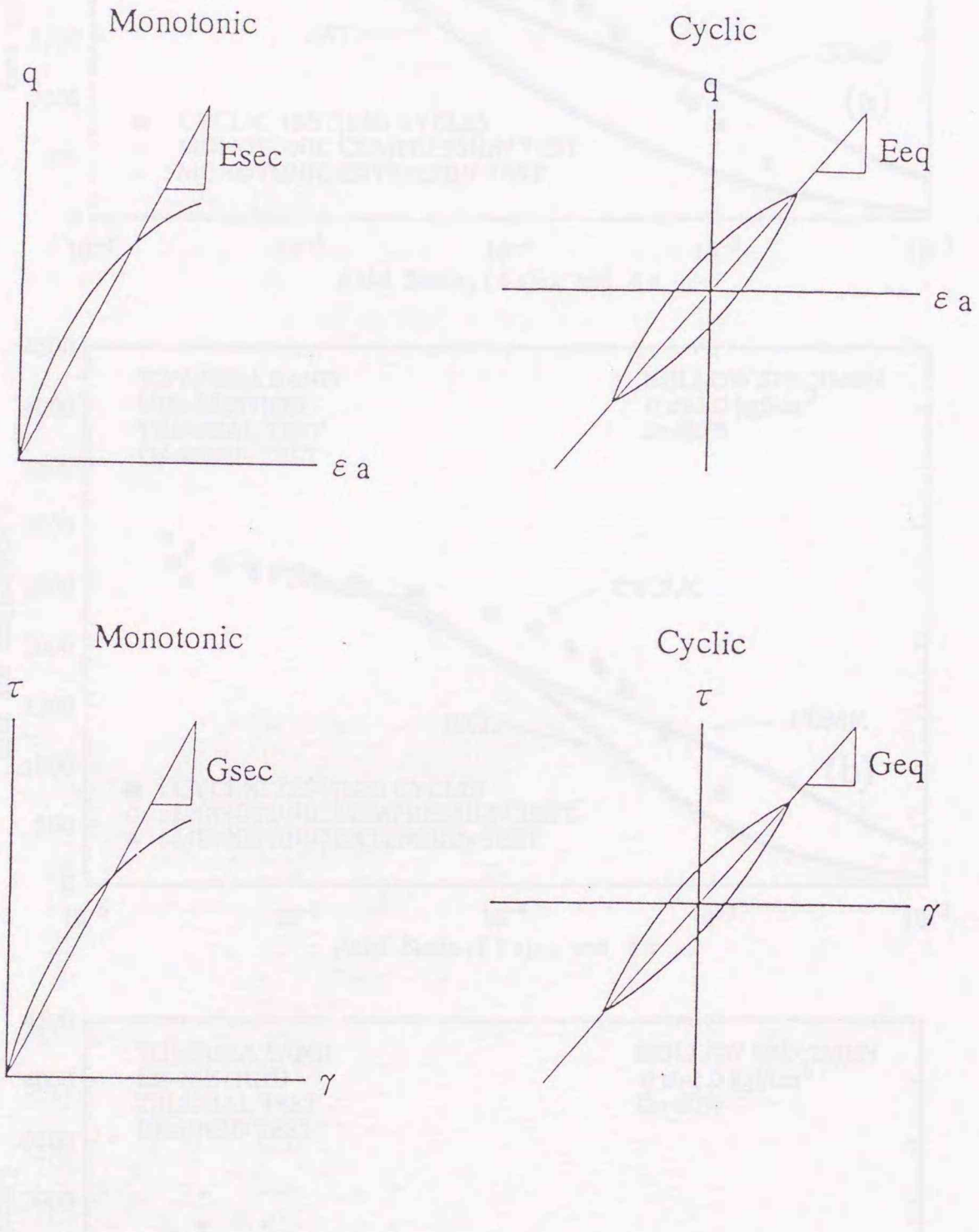


図４－59　Ｅsec，Ｅeq，Ｇsec，Ｇeqの定義

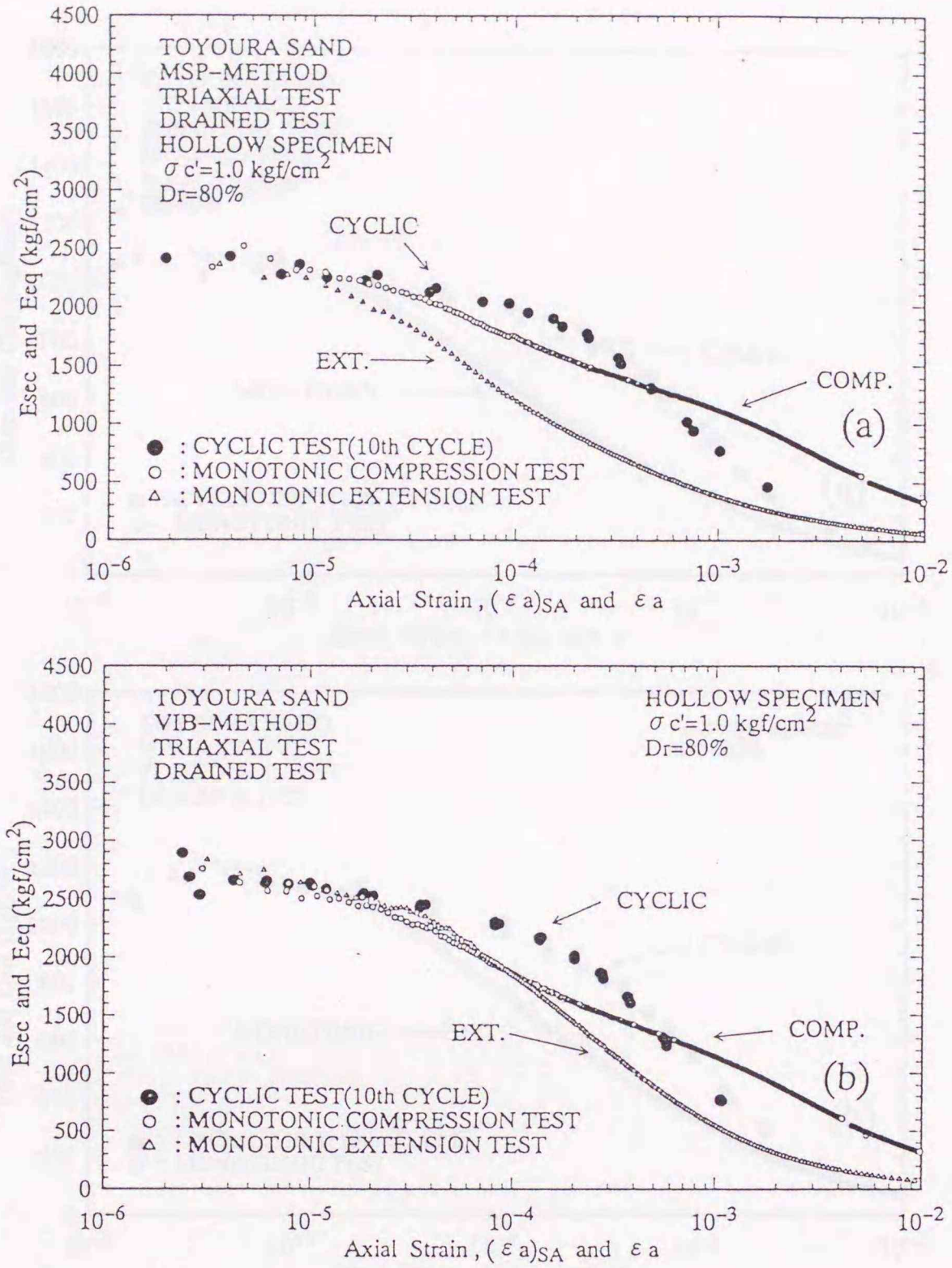


図４－６０　単調載荷試験と繰返し載荷試験の比較（三軸試験）
（a）ＭＳＰ供試体　（b）ＶＩＢ供試体　（c）ＣＥ供試体

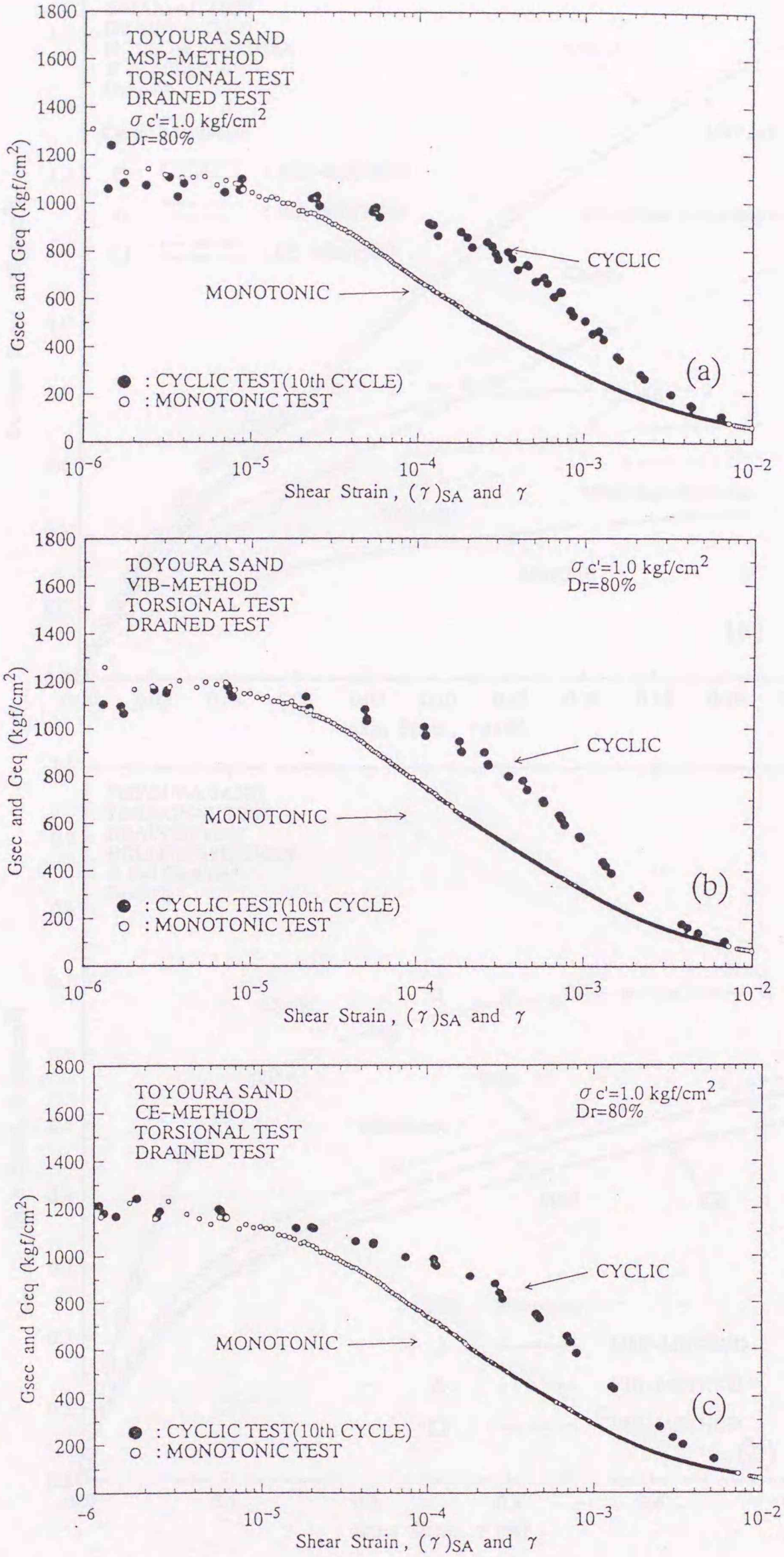


図４－61　単調載荷試験と繰返し載荷試験の比較（ねじり試験）
(a)ＭＳＰ供試体　(b)ＶＩＢ供試体　(c)ＣＥ供試体

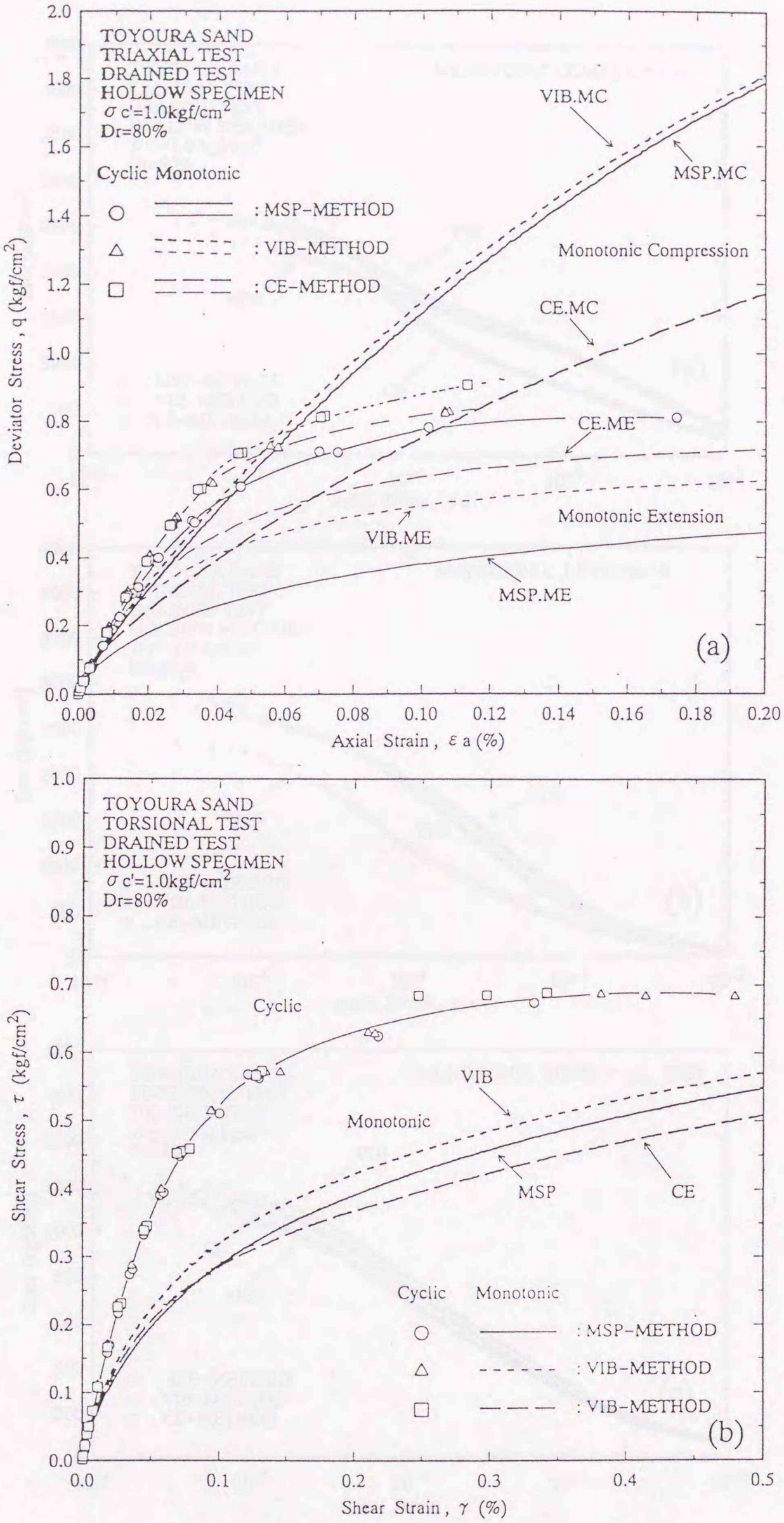


図 4 － 62　単調載荷試験と繰返し載荷試験での応力－ひずみ関係
(a)三軸試験　(b)ねじり試験

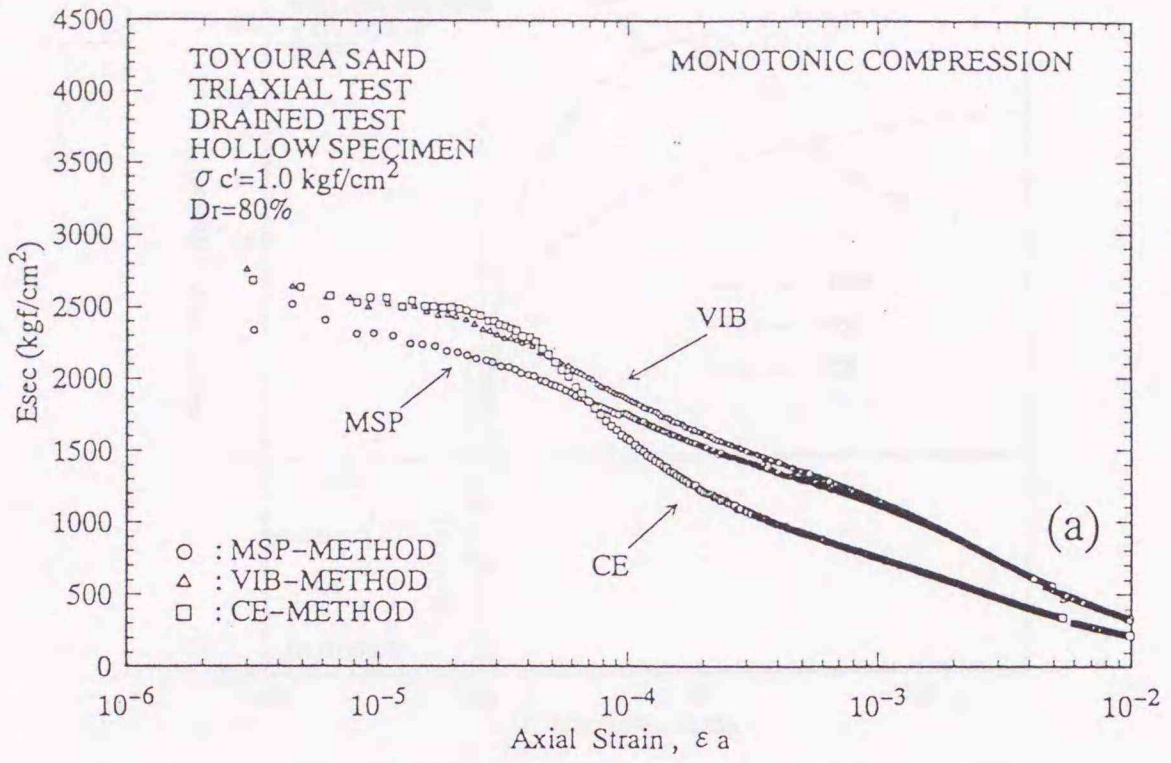


図４－６３　単調載荷試験での変形係数に及ぼす供試体作製方法の影響
（a）三軸圧縮試験　（b）三軸伸張試験　（c）ねじり試験

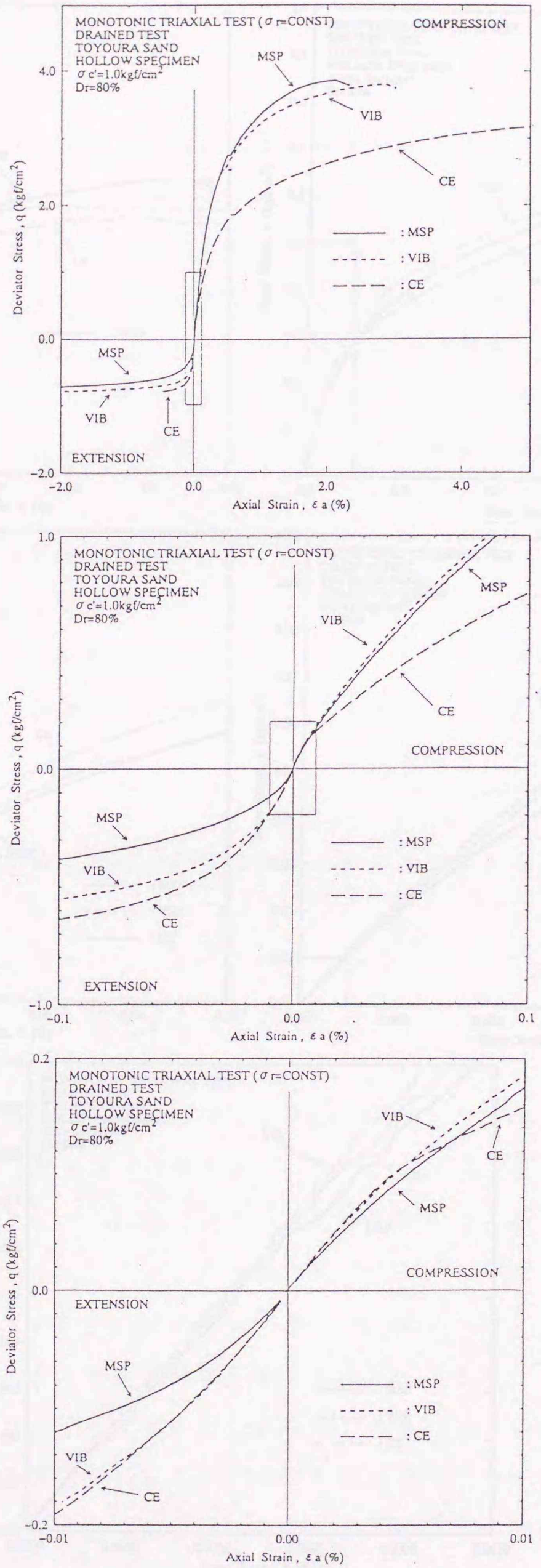
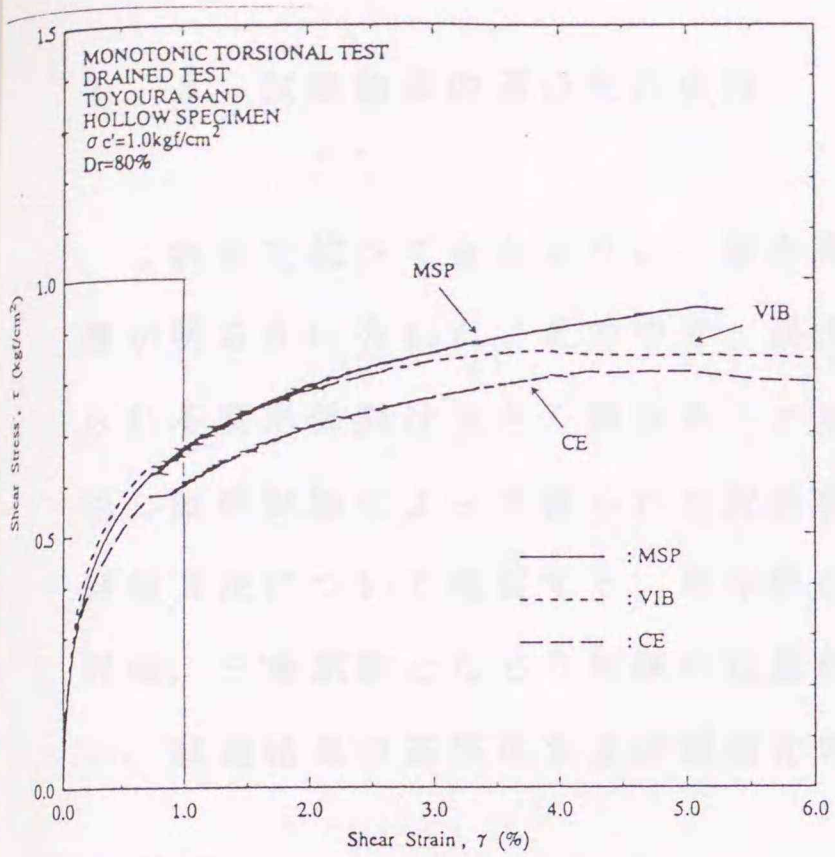
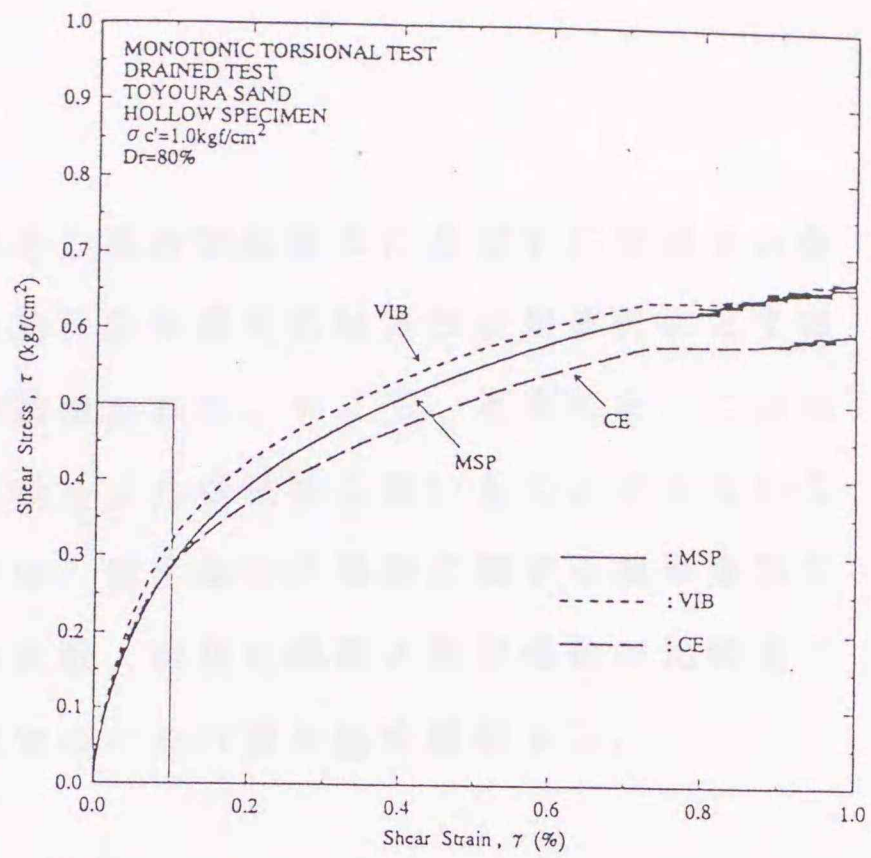
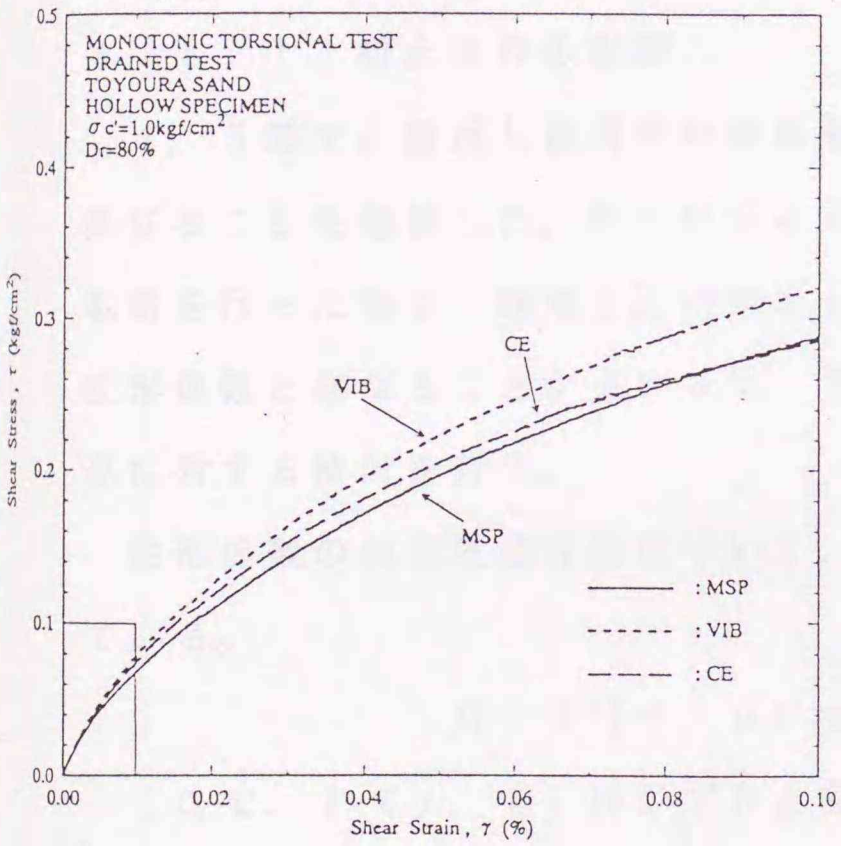
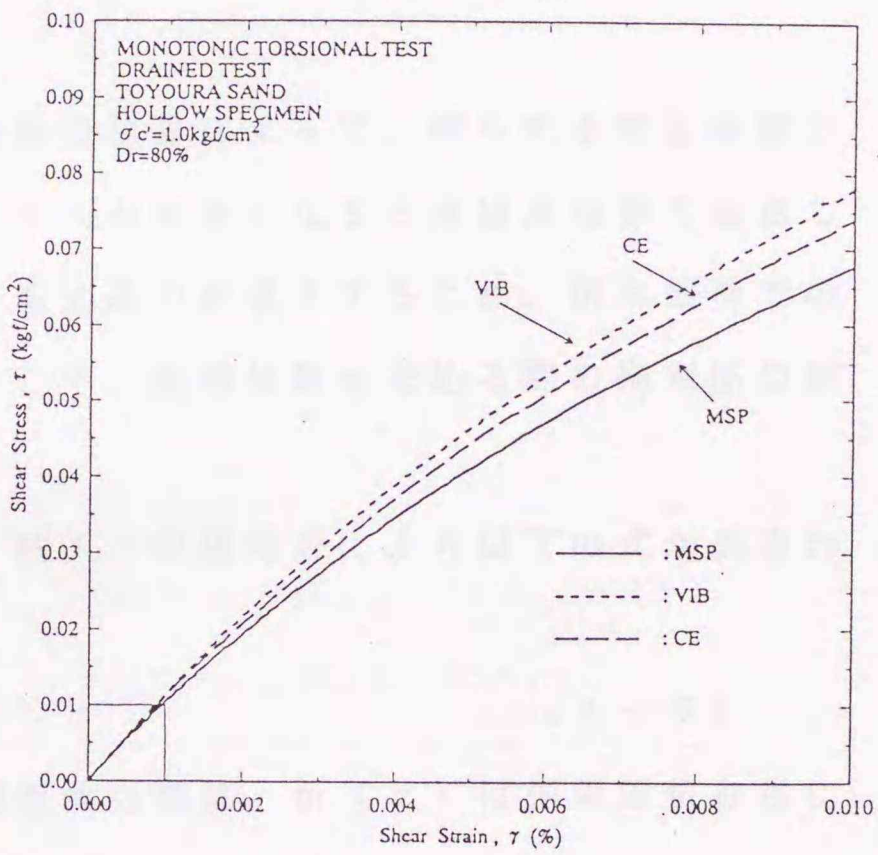


図 4 －64　異なるひずみレベルでの応力－ひずみ関係（三軸試験）









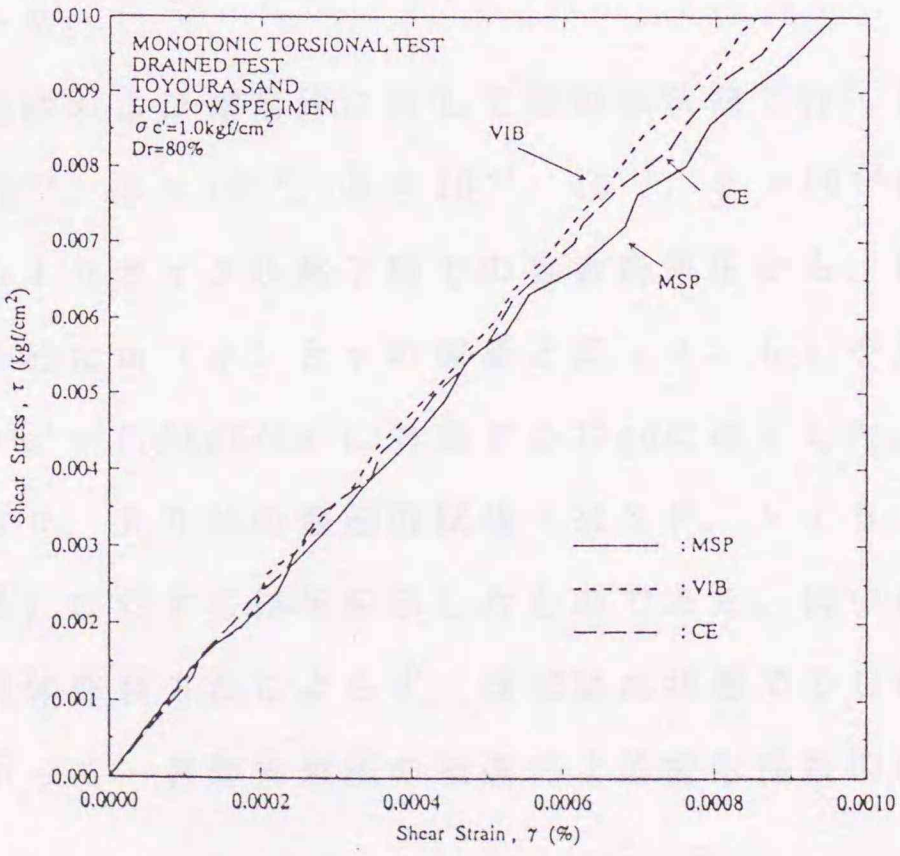


図 4－65　異なるひずみレベルでの応力－ひずみ関係（ねじり試験）

4．8　試験結果の適用性の検討

これまで述べてきたように、室内繰返し載荷試験結果に及ぼす各種因子の影響が明らかにされた。その中で、排水条件の相違や試験方法の相違によって得られる変形係数は大きく異なることが指摘された。そこで、本節においては繰返し載荷試験によって得られた変形係数をより信頼性の高いものとするための評価方法について検討する。具体的には、排水条件の相違に関する変形係数の評価、三軸試験とねじり試験の定量的比較、液状化強度と変形係数の比較を行い、試験結果の基準化および液状化判定のための適用性を検討する。

4．8．1　排水条件の影響

4．5節で、繰返し載荷時の排水条件の相違によって、得られる変形係数は異なることを指摘した。特にひずみレベルが大きくなると非排水状態で繰返し載荷を行った場合、間隙水圧が発生し有効応力が低下するため、排水載荷での変形係数と異なることが分かった。そこで、変形係数を求める際の拘束圧の相違に対する検討を行う。

変形係数の拘束圧依存性について、何人かの研究者により以下の式が表されている。

$$G = f(\gamma, e)\, p^{m(\gamma)} \qquad (4-6)$$

ここで、f（γ，e）はひずみと間隙比の関数、m（γ）は拘束圧依存性に関するパラメータ。

そこで、豊浦砂および相馬砂に対して非排水状態で行った中空ねじり試験での$(\gamma)_{SA} = 10^{-4}$，2×10^{-4}，5×10^{-4}，10^{-3}，2×10^{-3}におけるGeqの値を、繰返し載荷時の10サイクル終了時での有効拘束圧から、図4－66に示す龍岡（1981）がまとめたm（γ）とγの関係と式（4－6）を用いて、排水状態での有効拘束圧$\sigma c' = 1.0 kgf/cm^2$に対応するGeqに補正した。図4－67～69は相対密度Dr＝80，60％の豊浦供試体（MSP，VIB，CE）および相馬供試体（VIB）に対する結果を示したものである。図中の▲印で示すように、相対密度や供試体作製方法によらず、ほぼ排水状態でのGeqに一致することが分かる。したがって、有効拘束圧の相違による変形係数の相違に関しては、拘

束圧依存性を現すパラメータm(γ)を用いることによって、繰返し載荷中に拘束圧が変化した場合についても適用できることが分かる。ただし、この結果は中空ねじり試験における結果であり、三軸試験においてはひずみレベルが大きくなるにしたがってポアソン比も変化するので、非排水状態で求めた変形係数を上記のように補正したとしても、排水状態での変形係数に一致するとは限らないが、拘束圧の相違のみに関しては三軸試験においても適用できると考えられる。

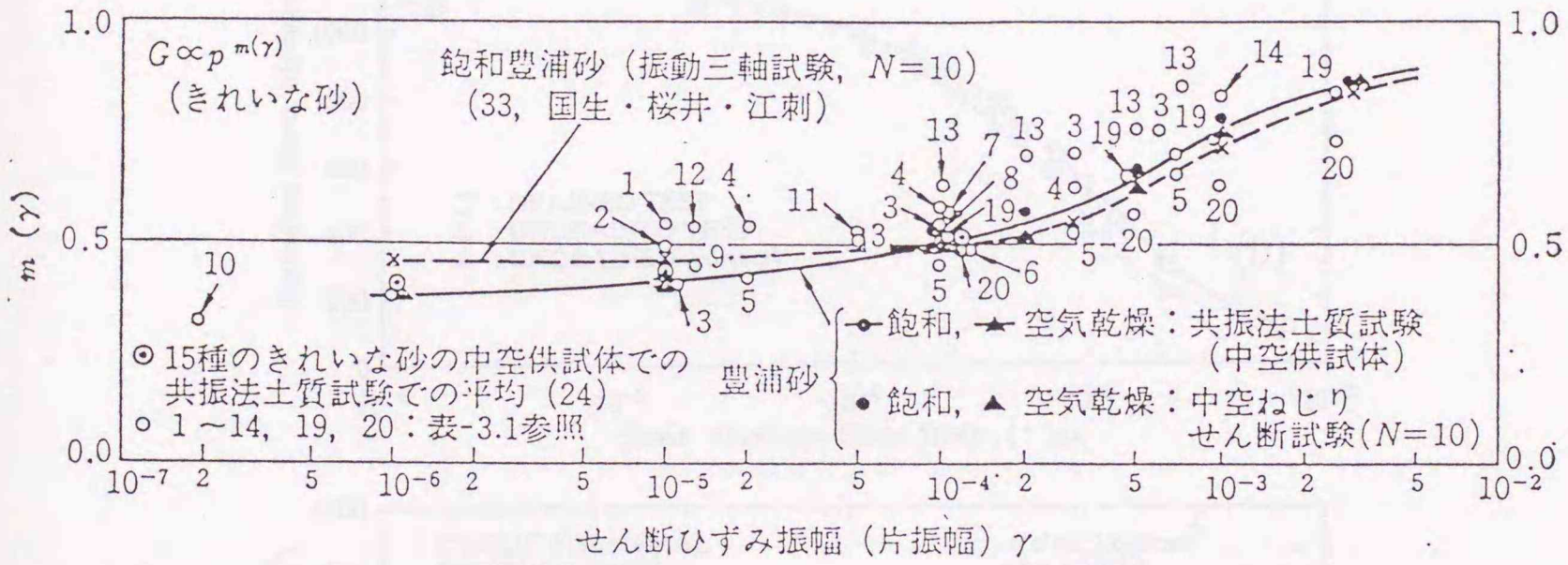


図4－66　べきm（γ）とせん断ひずみ振幅γとの関係（龍岡，1981）

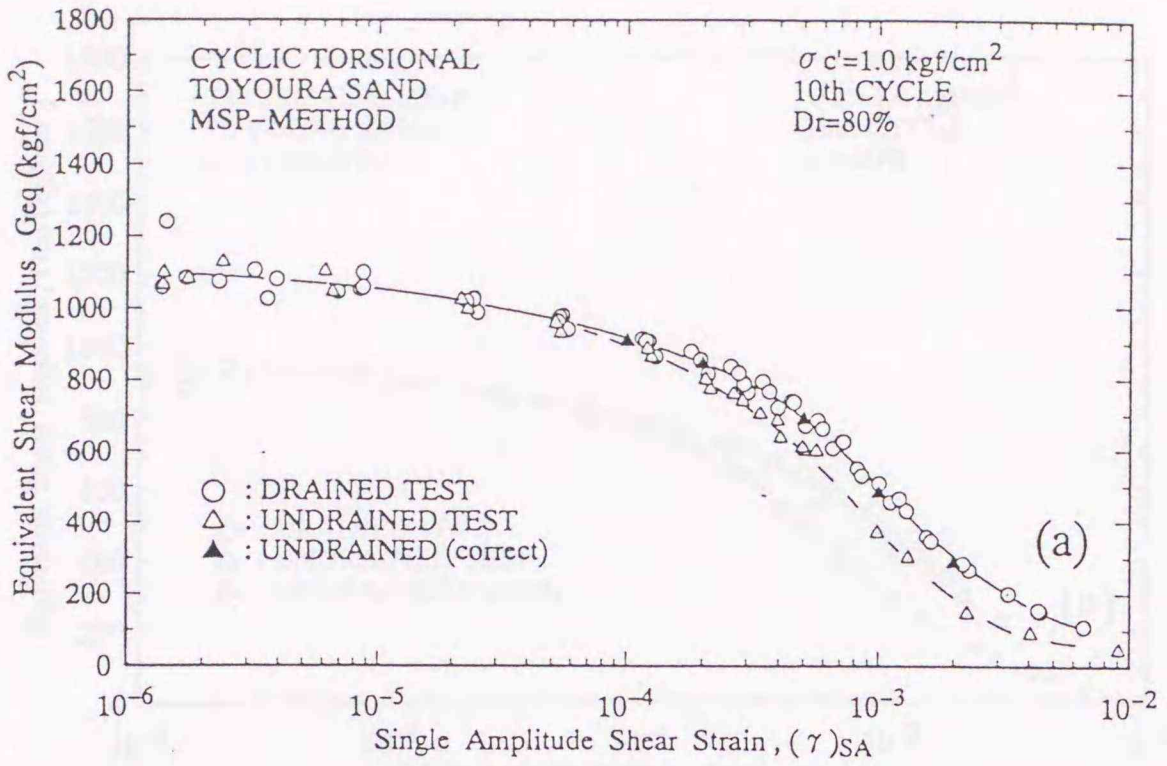


図４－67　非排水載荷における有効応力変化を補正した比較（Ｄｒ＝８０％）
(a)ＭＳＰ供試体　(b)ＶＩＢ供試体　(c)ＣＥ供試体

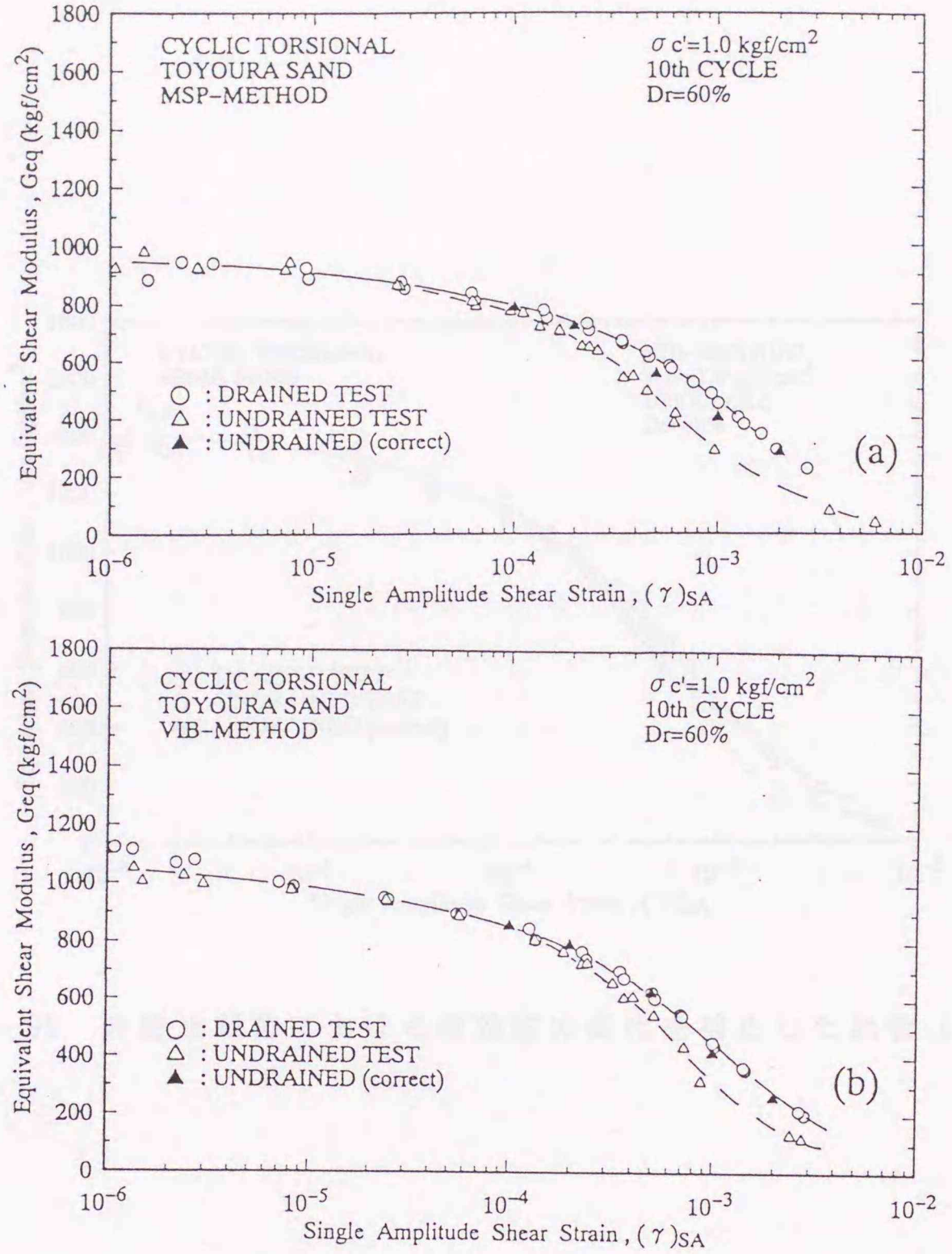


図４－68　非排水載荷における有効応力変化を補正した比較（Ｄｒ＝６０％）
(a)ＭＳＰ供試体　(b)ＶＩＢ供試体　(c)ＣＥ供試体

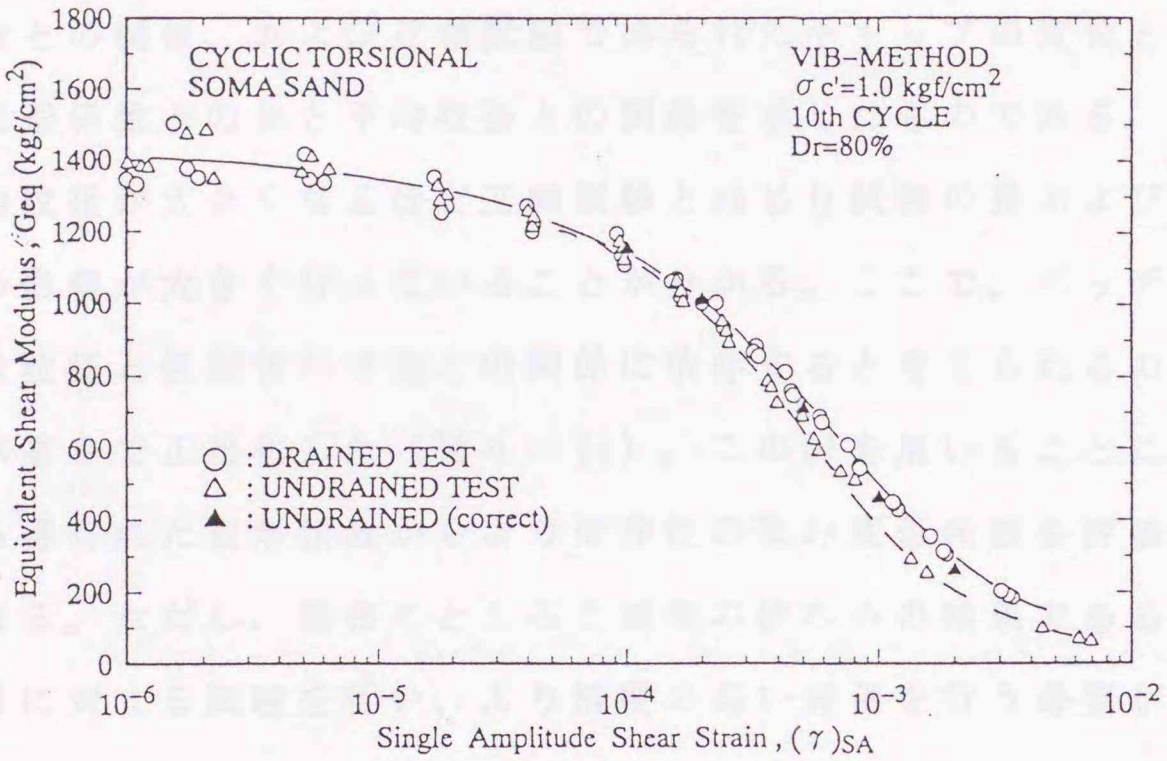


図４－69　非排水載荷における有効応力変化を補正した比較（相馬砂）

4．8．2　三軸試験と中空ねじり試験の定量的比較

4．6節で、三軸試験と中空ねじり試験で得られる変形係数は、中空ねじり試験の方が高くなった。また、その理由の一つとしてベッディングエラーの影響が指摘された。図4－70は、三軸試験とねじり試験での変形係数を比較するために、$(\gamma)_{SA}=10^{-6}$における三軸試験とねじり試験での変形係数と試料の平均粒径との関係、および三軸試験で得られたキャップの変位と局所変位から求めた変形係数との比と平均粒径との関係を示したものである。図に示したように平均粒径が大きくなるほど三軸試験とねじり試験の差およびベッディングエラーの影響が大きくなっていることが分かる。ここで、ベッディングエラーの影響は粒径と供試体の寸法との関係に依存すると考えられるので、平均粒径を供試体高さで正規化した（図4－71）。この図を用いることによって、三軸試験から得られた変形係数からより信頼性の高い変形係数を評価できるものと考えられる。ただし、現在にところ2種類の砂のみの結果であるので、今後多くの試料に対する試験を行い、より精度の高い評価を行う必要がある。

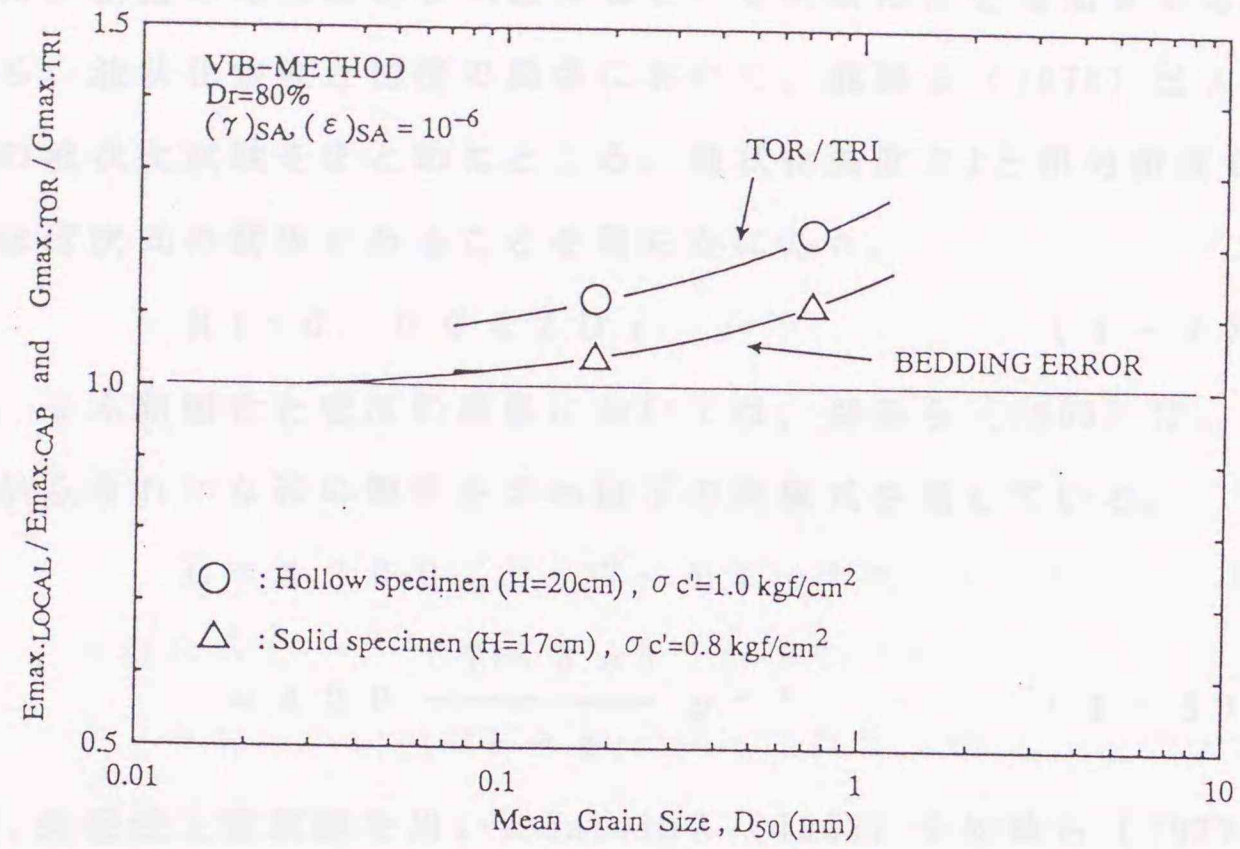


図 4 － 70　三軸試験とねじり試験の変形係数の相違と平均粒径との関係

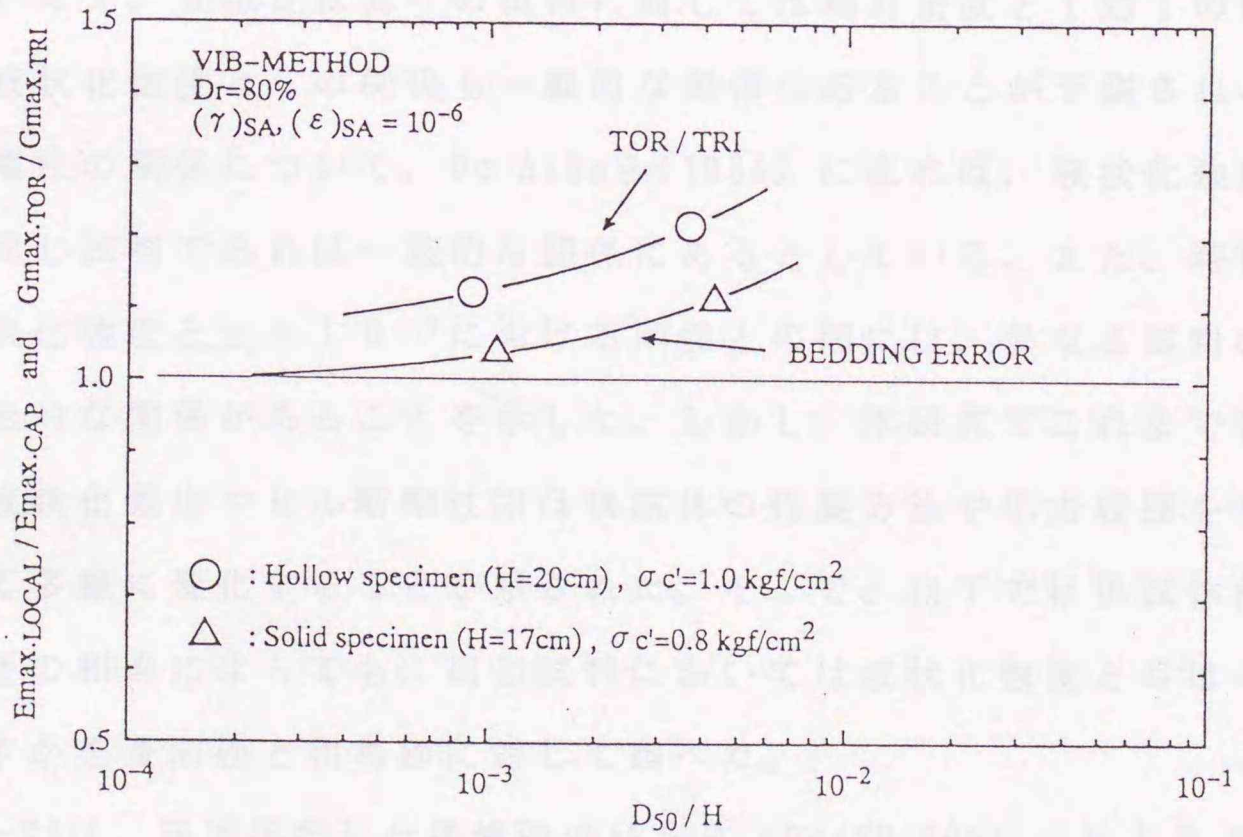


図 4 － 71　正規化した平均粒径との関係

4．8．3　せん断剛性率と液状化強度の関係

一般に、密度の増加は液状化強度およびせん断剛性を増加させることが知られている。液状化強度と密度の関係において、龍岡ら（1978）は人工的に詰めた試料の液状化試験をまとめたところ、液状化強度Ｒ1と相対密度Ｄｒ（％）との間にほぼ次式の関係があることを明らかにした。

$$R1 = 0.0042 Dr \qquad (4-7)$$

また、せん断剛性と密度の関係においては、柴田ら（1969）は、超音波パルス試験からきれいな砂の剛性を求め以下の実験式を現している。

$$G = 4200(0.7-n)p^{0.5} = 420\frac{(7-3e)}{1+e}p^{0.5} \qquad (4-8)$$

その他、共振法土質試験を用いたHardinら（1963）や岩崎ら（1977）によってきれいな砂に対する間隙比とせん断剛性との関係が提案されている。図４－72は、龍岡がそれらの結果をまとめたものであるが、きれいな砂のＧに関しては間隙比の関数として現せることができることが分かる。

したがって、間隙比は同一の試料に対しては相対密度と１対１の関係にあるので、液状化強度とＧの関係も一義的な関係にあることが予測される。液状化強度と剛性の関係について、De Albaら(1984）によれば、液状化強度と弾性波速度は同じ試料であれば一義的な関係にあるとしている。また、時松ら(1990)も、液状化強度と$\gamma = 10^{-6}$における剛性との間には、異なる試料の個々において線形的な関係があることを示した。しかし、本研究でこれまで得られたように、液状化強度やせん断剛性率は供試体の作製方法や応力履歴を受けることによって多様に変化することが示された。そこで、以下では供試体作製方法や応力履歴の相違によっても、同じ試料においては液状化強度とＧは一義的な関係を示すかを豊浦砂と相馬砂に対して調べた。

図４－73は、等方圧密した豊浦砂のＭＳＰ（Dr=80,60%）、ＶＩＢ（80%）、ＣＥ供試体（80，60%）と相馬砂供試体（ＶＩＢ，80%）に対して三軸試験と中空ねじり試験から得られた液状化強度と$(\gamma)_{SA} = 10^{-6}$におけるせん断剛性率Ｇmaxとの関係を示したものである。ここで、液状化強度は載荷回数２０回で両振幅軸ひずみ５％（中空ねじり試験では両振幅せん断ひずみ７．５％）が得

られる繰返し応力比で定義している。また、図中には岩崎・龍岡が現した液状化強度と相対密度の関係（式４－７）とせん断剛性率と間隙比の関係（図４－72中の②式）から、液状化強度とせん断剛性の関係をラインで示している。図から、液状化強度とせん断剛性率の関係は、それぞれの試料でラインで示された関係の回りに分布し、また、同一の試験方法および供試体作製方法では、密度が異なってもほぼラインに平行な関係が存在している。しかし、試験方法や供試体作製方法の相違によるばらつきは大きく、三軸試験の場合、ＭＳＰ供試体とＣＥ供試体では、ほぼ同じＧmaxを示すのに対して、液状化強度は２倍以上異なっている。したがって、液状化強度とせん断剛性率の関係は、同一の試験方法および供試体作製方法であれば、ここの試料で密度の関しては線形的な関係が存在すると言えるが、試験方法や供試体の作製方法によっては大きくその関係が異なり、液状化強度とせん断剛性の間に一義的な関係は存在しない異が分かる。

また、図４－74は異方圧密履歴を与えた供試体に対して三軸試験から得られた液状化強度とＧmaxの関係を示したものである。ＭＳＰ供試体やＶＩＢ供試体では、伸張の異方圧密履歴（Ｋ＝２．０）を受けることによって、液状化強度は増加するのに対し、Ｇmaxは減少し正の相関関係にはなっていない。

このように、液状化強度とＧmaxの関係は、同じ試料であっても供試体の作製方法が異なる場合や異方圧密履歴を受けることによってユニークな関係は存在せず、場合によっては逆の傾向も示すことが明らかにされた。

しかし、本研究で得られた三軸試験とねじり試験の液状化強度の関係（３．７節）および４．８．２で得られた三軸試験とねじり試験の変形係数の関係を用いることによって、三軸試験で得られる液状化強度および変形係数はねじり試験のそれとほぼ一致すると考えられるので、図４－73に示した液状化強度とせん断剛性率の関係は、本研究結果を用いれば良い相関関係が得られると言える。したがって、現在広く用いられている三軸試験結果から、試験結果を適切に評価することによって変形係数から液状化強度の推定もある程度可能と考えられる。

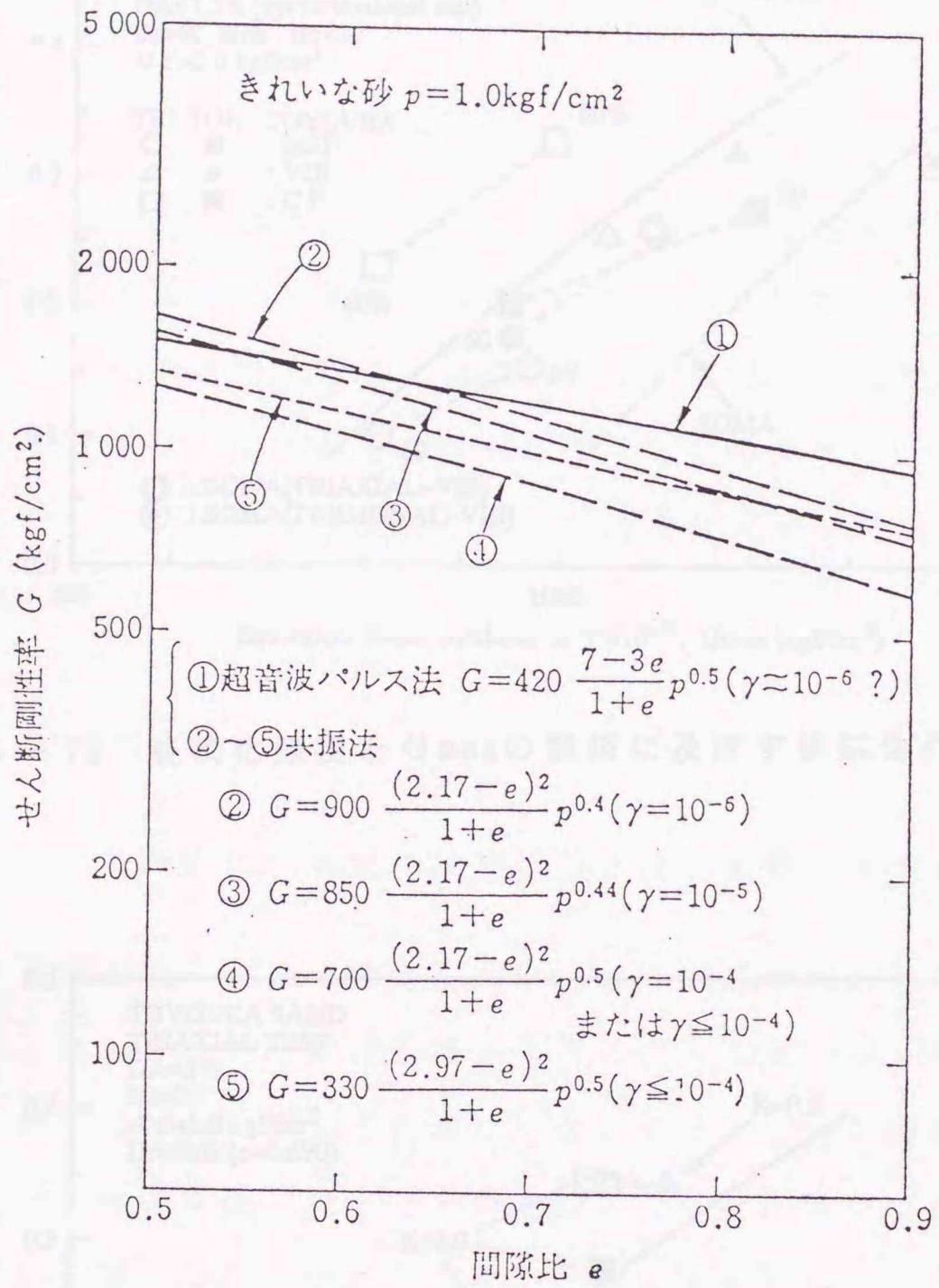


図4－72　きれいな砂でのGとeの関係（龍岡，1981）

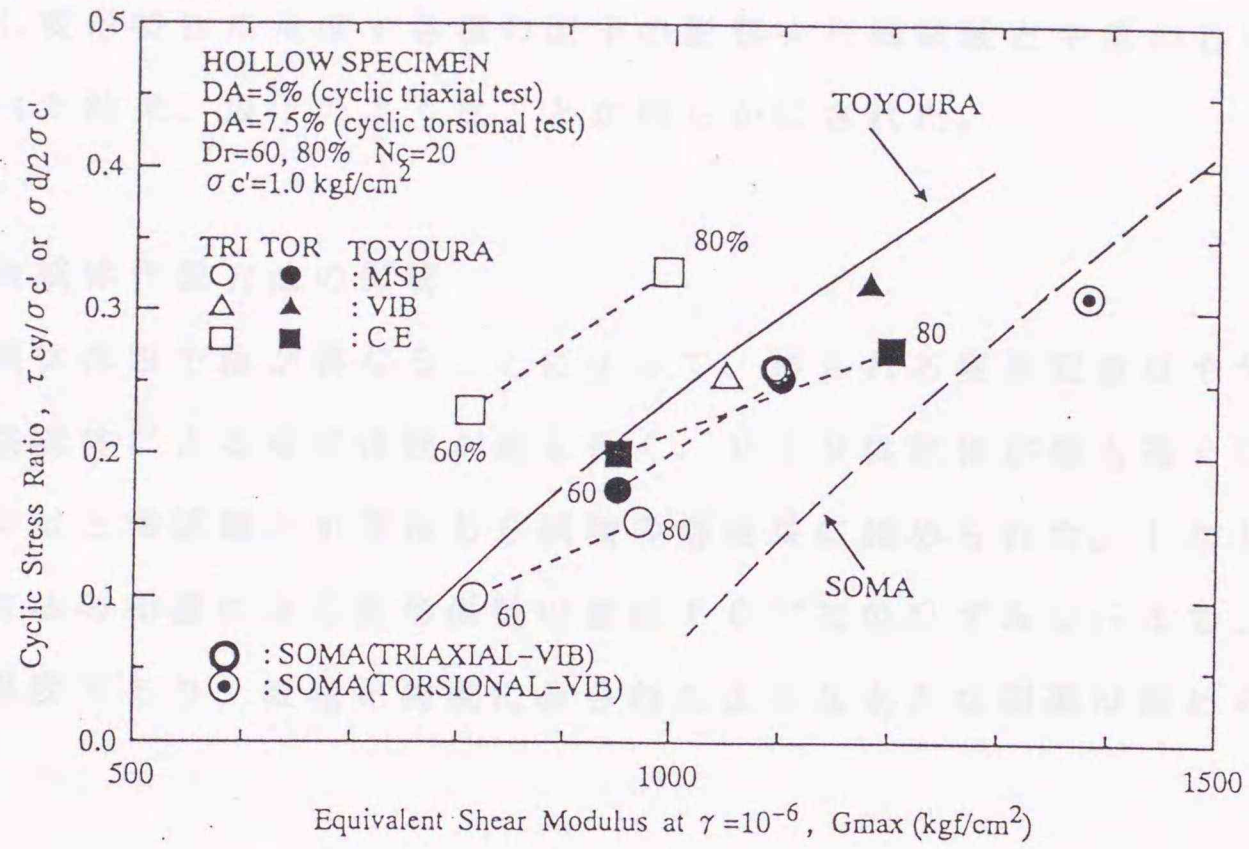


図 4 － 73　液状化強度とＧmaxの関係に及ぼす供試体作製方法の影響

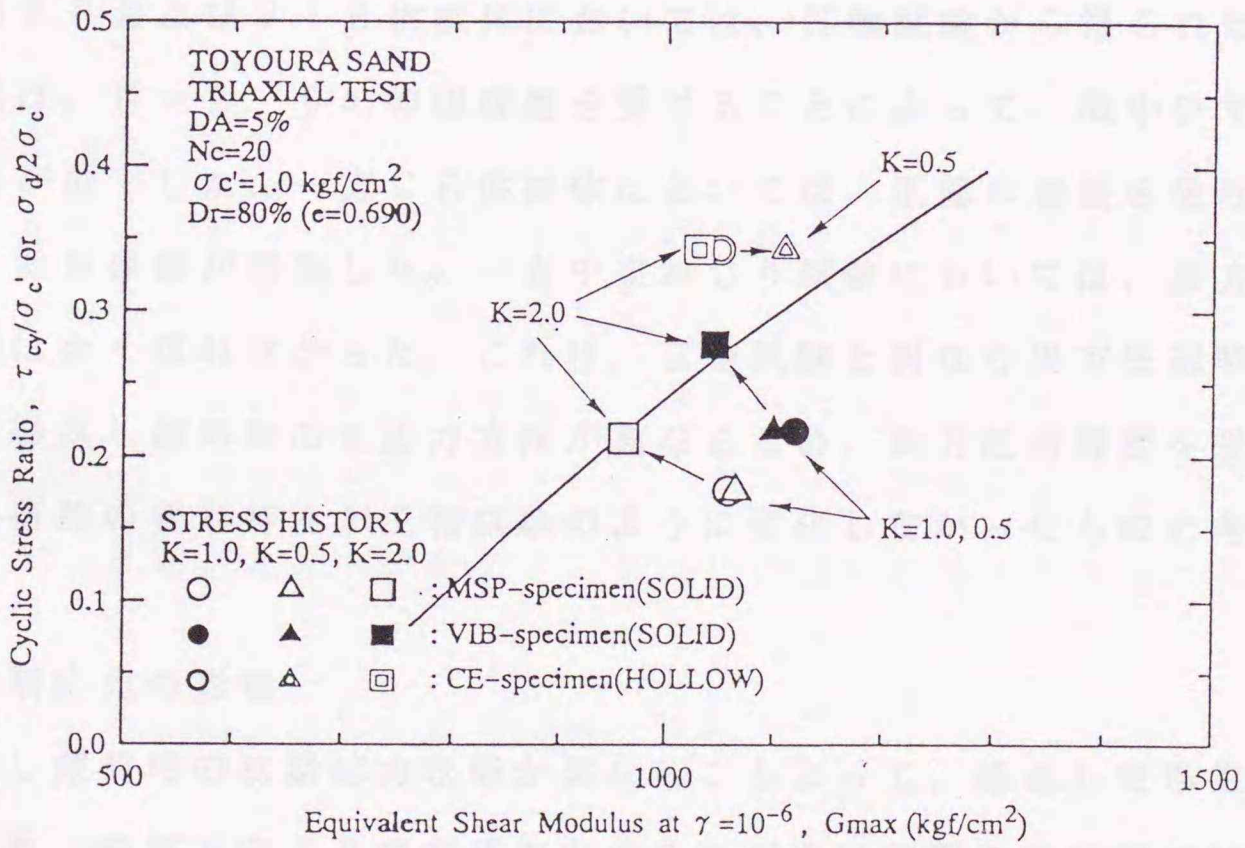


図 4 － 74　液状化強度とＧmaxの関係に及ぼす異方圧密履歴の影響

4．9　本章のまとめ

繰返し変形特性に及ぼす各種の因子の影響を三軸試験と中空ねじり試験によって調べた結果、以下のようなことが明らかにされた。

（1）供試体作製方法の影響

供試体作製方法が異なることによって、得られる変形定数はやや異なりＭＳＰ供試体による変形係数が最も低く、ＶＩＢ供試体が最も高くなった。この傾向は三軸試験と中空ねじり試験の両結果に認められた。しかし、供試体作製方法の相違による変形係数の差は10^{-6}でのひずみレベルで、１０～１５％程度であり、液状化強度にみられたような大きな相違は認められなかった。

（2）応力履歴の影響

１）繰返し変形特性に、過圧密履歴はほとんど影響を及ぼさない。

２）ＭＳＰおよびＶＩＢ供試体においては、三軸試験から得られた繰返し変形定数は、Ｋ＝２．０の伸張履歴を受けることによって、微小ひずみでの変形係数が低下した。一方ＣＥ供試体においては、圧縮の履歴を受けることによって変形係数が増加した。一方中空ねじり試験においては、異方圧密履歴の影響は全く現れなかった。これは、三軸試験と異なり異方圧密時の主応力方向と繰返し載荷時の主応力方向が異なるため、異方圧密履歴を受けても繰返し載荷時の変形特性が三軸試験のように変化しなかったものと考えられる。

（3）初期応力の影響

繰返し載荷時の初期応力状態が異なることよって、繰返し変形定数に差が認められ、鉛直方向よりの水平方向の応力が高い初期応力状態で試験をすると、どのひずみレベルにおいてもＧeqは低く、ｈは高くなった。また、正規化したＧeqとγとの関係においても、ひずみレベルが大きいところでは差は消滅しなかった。

（４）繰返し載荷方法の影響

１）測定する載荷回数によって得られる変形定数は変化するが、その変化の傾向は排水条件によって異なる。ひずみレベルが大きくなると排水状態では載荷回数の増加とともにＧは増加しｈは減少するが、非排水状態では逆にＧは減少しｈは増加する。これは、繰返し載荷に伴う間隙水圧の発生により有効応力が低下するためである。

２）繰返し載荷を非排水状態で与える試験では、ステージ数を多くするにつれひずみレベルが大きいところでＥeqは高くｈは低くなった。これは、以前のステージで受けた繰返し履歴による硬化の程度が、ステージ数の大小によって異なり、間隙水圧の発生量に相違が生じたためである。しかし、繰返し載荷を排水状態で与えた場合は、ステージ試験とフレッシュサンプル試験で差が生じなかった。

３）正弦波と三角波の載荷波形を用いて試験を行った結果、変形定数に載荷波形の影響は認められなかった。

（５）三軸試験と中空ねじり試験による比較

三軸試験と中空ねじり試験による繰返し変形定数を比較した結果、どの供試体作製方法においても三軸試験によるＧeqがひずみの範囲によらず低くなった。また、その差は試料の粒径が大きな程大きくなった。これは、主に三軸試験における供試体端面のベディングエラーの影響によるものと考えられたが、三軸試験とねじり試験の応力条件の相違の影響も考えられる。

（６）単調載荷試験と繰返し載荷試験の比較

１）微小ひずみレベルでは単調載荷試験と繰返し載荷試験による変形係数は、試験方法および供試体作製方法によらずほぼ一致した。しかし、単調載荷試験での弾性範囲は繰返し載荷試験で得られるそれよりも小さい。

（７）試験結果の適用性の検討

１）拘束圧依存性を表すｍ（γ）を繰返し載荷時の有効応力変化に対しても適用できることが明らかにされた。

２）三軸試験とねじり試験の変形係数の関係は、試料の粒径をパラメータにすることによって定量的比較が可能であることが示された。

３）液状化強度と微小ひずみでの変形係数との関係は、同じ試料を用いても供試体作製方法の相違や異方圧密履歴を受けることよって多様に変化し、従来言われているような一義的な関係は存在しなかった。しかし、本研究結果を用いて、三軸試験での変形係数または液状化強度を補正することによって、ある程度の相関が見いだされた。

第5章　結　論

地震の多発国である日本においては、地震が発生した際に起きる砂質地盤の液状化現象により多大な被害が生じている。この現象のメカニズムを解明し、その対策を行うためには、地盤材料が繰返し載荷を受けたときの強度特性および変形特性を正確に測定する試験方法を確立するとともに、試験結果に及ぼす各種因子の影響を定量的に把握していなければならない。

本論文は、このような背景のもとで、室内試験から砂の繰返し載荷に対する変形・強度特性を求め、試験結果に及ぼす各種因子の影響を定量的に評価するとともに、得られた試験結果から現状の液状化判定方法への適用性の検討、および現在基準化されていない繰返し変形試験方法の確立のための提言を行ったものである。

本論文は5章よりなっており、得られた結論を要約すると以下のようである。

第1章では、本研究の背景、目的および内容の概要について述べた。

第2章では、本研究で用いた試料、および著者が新たに開発した供試体作製方法を含む試験方法について述べた。また、微小なひずみレベルからの変形特性を正確に測定するために改良した試験装置の概要について示した。

第3章では、液状化試験結果に及ぼす諸因子の影響について、その定量的評価と試験結果の液状化判定への適用性について検討した。具体的には、供試体作製方法、過圧密履歴および異方圧密履歴の影響について検討するとともに、三軸試験とねじり試験から得られた液状化強度の比較を行い、通常の液状化判定に用いられている三軸試験結果から、実際の地盤内における応力条件を考慮した液状化強度の推定方法を示した。

この中で、供試体作製方法の影響については、作製方法の相違によって得られる液状化強度は異なり、特に三軸試験においては供試体作製方法によって2倍以上も液状化強度が異なることを明らかにした。このことは、異方的な堆積状態にある原位置から鉛直方向に採取した不攪乱試料を用いて三軸試験から液

状化強度を推定する場合、堆積の状況によっては実際の地盤の液状化強度を正確に判定することができないことも示している。

そこで、実際の地盤内おける地震時の応力状態をより的確に再現できるねじり試験を行い、三軸試験結果と比較した。その結果、三軸試験と地盤内での応力条件の相違を考慮した液状化強度の推定を行うために、新しいパラメータとして軸ひずみ比εa•comp./DAの導入を提案し、三軸試験で得られた液状化強度から、在来の方法にくらべ信頼性の高い液状化強度の予測が可能であることを示した。ただし、本研究以外の供試体作製方法および試料を用いた結果と比較した場合、ややばらつきが認められる結果となった。今後は、砂以外の地盤材料を対象とした検討を行い、本研究成果の適用性をさらに検討する必要があると思われる。

第4章では、繰返し変形特性に及ぼす供試体作製方法、応力履歴、試験装置の相違、および繰返し変形試験特有の問題である繰返し荷重の載荷方法の影響について検討した。その結果、変形定数を室内試験から求める場合、三軸試験から得られる変形定数はねじり試験よりも多くの因子の影響を受けるが、それらの影響を定量的に評価することによって、試験が容易で普及度の高い三軸試験から、十分に信頼できる結果を得ることができることを示した。

また、変形係数を単調載荷試験からも求め、繰返し載荷試験から得られた変形特性との比較を行い、同一の試験方法と供試体作製方法を用いれば、両試験での微小ひずみレベルでの変形係数は一致することを示した。このことから、単調載荷試験の測定精度を向上することによって、1つの供試体から従来は求めることができなかった微小ひずみ領域での変形係数と破壊強度を同時に求めることができることも示している。

さらに、第3章で得られた液状化強度とせん断剛性率の関係を比較し、供試体作製方法や試験方法が異なる場合、両者の間には在来いくつかの報告で示されているような、一義的な関係が必ずしも存在しないことを示した。しかし、本研究結果を用いて、三軸試験での変形係数または液状化強度を補正することによって、ある程度の相関が見いだされた。

以上のように構成された本論文より、微小ひずみレベルから液状化に至るような大ひずみ領域までの広範なひずみレベルでの、砂の繰返し載荷に対する変形特性および強度特性に及ぼす各種因子の影響が定量的に評価された。この中で、三軸試験から得られる繰返し載荷時の変形・強度特性は中空ねじり試験よりも影響因子が多いが、試験結果を定量的に評価することによって、試験が容易で、普及度の高い三軸試験から十分に信頼できる結果を得ることができることも明らかにされた。また、試験結果から、動的変形試験方法の確立のための有用な提言を示すとともに、三軸試験から得られた液状化強度から、供試体の異方性と試験時の応力系を考慮した液状化判定への適用性が示された。

今後、本研究結果と原位置試験結果との比較、各種因子の影響が実際の応答解析にどの程度の影響を及ぼすかの定量的な検討、本研究結果の砂以外の地盤材料に対する検討等を行い、地盤の動的挙動解析のための本研究結果の適用性および信頼性を高める必要がある。

参考文献

1)Baldi,G. and Nova,R.(1984):"Membrane penetration effects in triaxial testing," Proc.ASCE, Vol.110, No.GT3, pp.403-420.

2)De Alba,P., Baldwin,K., Janoo,V., Roe,G. and Celikkol,B.(1984): "Elastic-wave velocities and liquefaction potential," Geotechnical Testing Journal, Vol.7, No.2, pp.77-87.

3)Drnevich,V.P. and Richart,F.E.(1970):"Dynamic prestraining of dry sand," Proc. ASCE, Vol.96, No.SM6, pp.453-469.

4)土質工学会(1990):"土質試験の方法と解説,"

5)榎並昭・安達俊夫・渡辺直樹・山田雅一(1984):"繰返し載荷を受ける砂の動的変形特性," 第19回土質工学研究発表会講演集, pp.571-572.

6)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.

7)Frydman,S., Zeitlen,J.G. and Alpan,I.(1973):"The membrane effect in triaxial testing of granular soils," Journal of Testing and Evaluation, Vol.1, No.1, pp.37-41.

8)Flavigny,E. and Darve,F.(1979):"Discussion on the paper by Kiekbush and Schuppener," Proc. ASCE, Vol.105, No.GT1, pp.115-117.

9)Ghaboussi,J. and Momen,H.(1982):"Modelling and analysis of cyclic behaviour of sands," Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, John Wiley and Sons Ltd., pp.313-342.

10)Goto,S.(1987):"Strength and deformation characteristics of granular materials in triaxial tests," Dr.Eng.Thesis, University of Tokyo.

11)Hardin,B.O. and Drenevich,V.P.(1972):"Shear modulus and damping in soils measurement and parameter effects," Proc. of ASCE, Vol.98, No.SM6, pp.603-624.

12)Hardin,B.O. and Richart,F.E.,Jr.(1963):"Elastic wave velocities in granular soils," Proc. of ASCE, Vol.89, No.SM1, pp.33-65.

13)飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会（委員長 土岐祥介）(1988):"飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験の結果について,"土の非排水繰返し三軸試験－室内試験、原位置および試験結果の利用－に関するシンポジウム論文集, pp.1-35.

14)Ishihara,K. and Takatsu,H.(1979):"Effects of overconsolidation and K_0 conditions on the liquefaction characteristics of sands," Soils and Foundations, Vol.19, No.4, pp.59-68.

15)Ishihara,K., Iwamoto,S., Yasuda.S. and Takatsu,H.(1977): "Liquefaction of anisotropically consolidated sand," Proc. of 9th ICSMFE, Tokyo, Vol.2, pp.261-264.

16)Ishihara,K. and Yasuda,S.(1975):"Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation," Soils and Foundations, Vol.15, No.1, pp.45-59.

17)Jamiolkowski,M. and Lo Presti,D.C.F.(1993):"Anisotropy of soil stiffness at small strain," Proc. of 9th Asian Regional Conf. on Soil Mech. and Found.Eng., Bangkok, Vol.2, pp.195-196.

18)Kiekbusch,M. and Schuppener,B.(1977):"Membrane penetration and its effect on pore pressures," Proc.ASCE, Vol.103, No.GT11, pp.1267-1279.

19)Kokusho,T.(1980):"Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range," Soils and Foundations, Vol.20, No.2, pp.45-60.

20)Lade,P.V. and Hernandez,S.B.(1977):"Membrane penetration effects in undrained tests," Proc. ASCE, Vol.103, No.GT2, pp.109-125.

21)Martin,G.R., Finn,W.D.L. and Seed,H.B.(1978): "Effects of system compliance on liquefaction tests," Journal of the Geotechnical Engineering Divison, ASCE, Vol.104, No.GT4, pp.463-479.

22)松本徳久・安田成夫・大久保雅彦・木下靖(1990):"粗粒材料のせん断強度と動的変形特性," 土木学会論文集, 第424号, Ⅲ-14, pp.95-104.

23)三浦均也・土岐祥介・長谷川敬寿(1989):"粒度組成の異なる砂の変形・破壊挙動," 第24回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542.

24)Miura,S. and Toki,S.(1984a):"Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sands sampled from natural deposits," Soils and Foundations," Vol.24, No.3, pp.69-84.

25)Miura,S., Toki,S. and Tanizawa,F.(1984b):"Cone penetration characteristics and its correlation to static and cyclic deformation-strength behaviors of anisotropic sand," Soils and Foundations," Vol.24, No.2, pp.58-74.

26)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.

27)三浦清一・土岐祥介・彦坂茂・山下聡(1988a):"粒状体の三軸試験におけるメンブレン貫入について," 土質工学会北海道支部技術報告集, 第28号, pp.141-150.

28)三浦清一・土岐祥介・彦坂茂・山下聡・鎌田強(1988b):"密な砂の非排水三軸挙動に及ぼすメンブレンの影響," 第23回土質工学研究発表会講演集, pp.659-662.

29)三浦清一・土岐祥介・山下聡・青野哲成(1986):"砂の非排水繰返し三軸試験法と液状化強度の評価に関する研究," 土質工学会北海道支部技術報告集, 第26号, pp.55-64.

30)Molenkamp,F.(1985):"Discussion on the paper by Baldi and Nova," Proc. ASCE, Vol.111, No.GT8, pp.1047-1048.

31)Molenkamp,F. and Tatsuoka,F.(1983):"Discussion on the paper by Sarsby et al.," Proc. ASCE, Vol.109, No.GT9, pp.766-771.

32)Molenkamp,F. and Luger,H.J.(1981):"Modelling and minimization of membrane penetration effects in tests on granular soils," Geotechnique, Vol.31, No.4, pp.471-486.

33)Mulilis,J.P., Seed,H.B., Chan,C.K., Mitchell,J.K. and Arulanandan,K. (1977):"Effects of sample preparation on sand liquefaction," Proc. ASCE, Vol.103, No.GT2, pp.91-108.

34)Newland,P.L. and Allely,B.H.(1959):"Volume changes during undrained triaxial tests on satuated dilatant granular materials," Geotechnique, Vol.9, No.4, pp.174-182.

35)Newland,P.L. and Allely,B.H.(1957):"Volume changes in drained triaxial tests on granular materials," Geotechnique, Vol.7, No.1, pp.17-34.

36)大原・山本(1982):"動的三軸による液状化におけるゴム膜貫入量の影響について," 土質工学会論文報告集, Vol.22, No.1, pp.127-135.

37)Pradhan,T.B.S., Tatsuoka,F. and Horii,N.(1988):"Simple shear testing on sand in a torsional shaer apparatus," Soils and Foundations, Vol.28 ,No.2, pp.95-112.

38)Raju,V.S. and Venkataramana,K.(1980):"Undrained triaxial tests to assess liquefaction potential of sand -Effect of membrane penetration-," Proc.International Symposium on Soil under Cyclic and Transient Loading, pp.483-494.

39)Raju,V.S. and Sadasivan,S.K.(1974):"Membrane penetration in triaxial tests on sands," Proc.ASCE, Vol.100, No.GT4, pp.482-489.

40)Ramana,K.V. and Raju,V.S.(1982):"Membrane penetration in triaxial tests," Proc. ASCE, Vol.108, No.GT2, pp.305-310.

41)Roscoe,K.H.,Schofield,A.H. and Thurairajah,A.(1963):"An evaluation of test data for selecting a yield criterion for soils," ASTM, STP361, pp.111-128.

42)Seed,H.B.,Mori,K.and Chan,C.K.(1977):"Influence of seismic history on liquefaction of sands," Proc. ASCE, Vol.103, No.GT4, pp.257-270.

43)Seed,H.B. and Lee,K.L.(1966):"Liquefaction of saturated sand during cyclic loading," Proc. ASCE, Vol.91, No.SM6, pp.105-134.

44)Silver,M.L., Tatsuoka,F., Phukunhaphan,A. and Avramidis,A.S.(1980): "Cyclic undrained strength of sand by triaxial test and simple shear test," Proc. of the 7th World Conference on Earthquake Engineering, Turkey.

45)Silver et al.(1976):"Cyclic triaxial strength of standard test sand," Proc. ASCE, Vol.102, No.GT5, pp.511-523.

46)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.

47)砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会（委員長土岐祥介）(1984):" 飽和豊浦砂の繰返し三軸試験における変形特性に及ぼす諸因子に関する共同研究報告および同続報," 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論文集、pp.7-46.

48)柴田徹・土岐憲三・寺田邦雄(1969):"砂中の弾性波速度について,"第９回土質工学研究発表会

49)武田哲伸・土岐祥介・山下聡・三好健夫(1992a):"北海道に分布する火山灰の動的変形特性に関する２,３の実験," 火山灰に関する研究討論会論文集, pp.37-44.

50)武田哲伸・土岐祥介・山下聡・三好健夫(1992b):"動的変形定数に及ぼす載荷波形とステージ数の影響," 土木学会第47回年次学術講演会概要集,

51)田中敬三・時松孝次(1988):"液状化試験結果に対するMembrane Penetrationの簡便な評価方法," 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.85-88.

52)Tatsuoka,F. and Shibuya,S.(1992):"Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests," Proc. of 9ARCSMFE, Vol.2, pp.53-114.

53)Tatsuoka,F., Kato,H., Kimura,M. and Pradhan,T.B.S.(1988): "Liquefaction strength of sands subjected to sustained pressure," Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.119-131.

54)Tatsuoka,F., Ochi,K., Fujii,S. and Okamoto,M.(1986a):"Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sand for different sample preparation methods," Soils and Foundations, Vol.26, No.3, pp.23-41.

55)Tatsuoka,F., Toki,S., Miura,S., Kato,H., Okamoto,M., Yamada,S., Yasuda,S. and Tanizawa,F.(1986b): Soils and Foundations, Vol.26, No.3,pp.99-116.

56)Tatsuoka,F., Iwasaki,T., Yoshida,S., Fukusima,S. and Sudo,H.(1979a): "Shear modulus and damping by drained tests on clean sand specimens reconstituted by various methods," Soils and Foundations, Vol.19, No.1, pp.39-54.

57)Tatsuoka,F., Iwasaki,T., Fukusima,S. and Sudo,H.(1979b):"Stress conditions and stress histories affecting shear modulus and damping of sand under cyclic loading," Soils and Foundations, Vol.19, No.2, pp.29-43.

58)龍岡文夫(1981):"第３章土の動的変形特性," 新体系土木工学18土の力学(Ⅲ)－圧密・せん断・動的解析－, 技報堂出版

59)龍岡文夫・M.L.Silver・A.Phukunhaphan・A.S.Avramidis(1980):"振動三軸試験と動的単純せん断試験による砂の液状化強度," 第15回土質工学研究発表会, pp.569-572.

60)龍岡文夫・澁谷啓(1991):"三軸試験と原位置試験法との関連(変形特性について)," 三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集, pp.39-84.

61)Teachavorasinskun,S., Tatsuoka,F., Kenkyo,K. and Yasuhara,K.(1992):"Effect of cyclic prestraining on the liquefaction resistance of sand," Behaviour of Offshofe Structures Conference.

62)Thurairajah,A. and Roscoe,K.H.(1965):"The correction of triaxial compression test data on cohesionless granular media," Proc.6th ICSMFE, pp.377-381.

63)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.

64)土岐祥介・三浦清一・山下聡(1988):"三軸試験におけるメンブレン貫入とその評価," 土の非排水繰返し三軸試験シンポジウム論文集, pp.89-96.

65)土岐祥介・三浦清一・山下聡(1986):"飽和砂の非排水繰返し三軸強度に及ぼすＢ値の影響," 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.565-568.

66)Tokimatsu,K. and Uchida,A.(1990):"Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity," Soils and Foundations, Vol.30, No.2, pp.33-42.

67)Tokimatsu,K. and Nakamura,K.(1987):"A simplified correction for membrane compliance in liquefaction tests," Soils and Foundations, Vol.27, No.4, pp.111-122.

68)Tokimatsu,K. and Nakamura,K.(1986):"Liquefaction test without membrane penetration effects," Soils and Foundations, Vol.26, No.4, pp.127-138.

69)Torres,L.P.(1983):"Membrane penetration in cyclic triaxial test," University of California," Berkley.

70)Vaid,Y.P. and Negussey,D.(1984):"A critical assessment of membrane penetration in the triaxial test," Geotechnical Testing Journal, Vol.7, No.2, pp.70-76.

71)Wong,R.T., Seed,H.B. and Chan,C.K.(1975):"Cyclic loading liquefaction of gravelly soils," Proc. ASCE, Vol.101, No.GT6, pp.571-583.

72)Wu,H.C. and Chang,G.S.(1982):"Stress analysis of dummy rod method for specimen," Proc. ASCE, Vol.108, No.GT9, pp.1192-1197.

73)安田進(1988):"液状化の調査から対策工まで," 鹿島出版会
74)安田進・山口勇(1983):"繰返し載荷中の排水条件が減衰定数に与える影響" 第18回土質工学研究発表会, pp.505-506.
75)吉見吉昭(1991):"砂地盤の液状化（第二版)," 技報堂出版
76)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.
77)Yamashita,S. and Toki,S.(1991):"Comparion of cyclic triaxial and torsional strengths," Proc. of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.103-106.
78)山下聡・土岐祥介(1992a):"広範なひずみレベルにおける砂の動的変形・強度特性," 土質工学会北海道支部技術報告集, 第32号, pp.89-98.
79)山下聡・土岐祥介・飯塚雅之(1992b):"広範なひずみレベルにおける飽和砂の繰返し変形特性," 第27回土質工学研究発表会講演集
80)山下聡・土岐祥介・飯塚雅之(1992c):"飽和砂の動的変形定数に及ぼす供試体作製法と異方圧密履歴の影響," 土木学会第47回年次学術講演会概要集
81)山下聡・土岐祥介(1991a):"繰返し三軸および中空ねじり試験による液状化強度に及ぼす構造異方性の影響," 土質工学会北海道支部技術報告集, 第31号, pp.101-110.
82)山下聡・土岐祥介(1991b):"繰返し三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.725-728.
83)山下聡・土岐祥介・三浦均也(1990a):"不攪乱砂の液状化強度に及ぼす過圧密履歴の影響," 土質工学会北海道支部技術報告集, 第30号, pp.55-64.
84)山下聡・土岐祥介・三浦均也(1990b):"過圧密履歴を受けた不攪乱砂の液状化強度," 第25回土質工学研究発表会講演集, pp.737-740.
85)山下聡・土岐祥介・三浦清一(1990c):"異方圧密履歴による構造異方性砂の液状化挙動の変化," 土質工学会論文報告集, Vol.30, No.2, pp.167-178.
86)山下聡・土岐祥介・三浦均也(1989a):"自動制御による動的中空ねじりせん断試験," 土質工学会北海道支部技術報告集, 第29号, pp.61-68.
87)山下聡・土岐祥介・三浦均也(1989b):"メンブレン貫入の影響を考慮した非排水繰返し三軸強度とねじりせん断強度," 第24回土質工学研究発表会講演集, pp.777-780.
88)山下聡・土岐祥介・三浦清一(1988a):"飽和砂の液状化特性に及ぼす初期構造と異方圧密履歴の影響, 土質工学会北海道支部技術報告集, 第28号, pp.125-132.
89)山下聡・土岐祥介・三浦清一(1988b):"異方圧密履歴を受けた飽和砂の液状化特性(第3報)," 第23回土質工学研究発表会講演集, pp.673-676.
90)山下聡・土岐祥介・三浦清一(1988c):"飽和砂の液状化特性に及ぼす異方圧密履歴の影響," 土質工学会論文報告集, Vol.28, No.3, pp.185-196.

91)山下聡・土岐祥介・三浦清一・三浦均也(1987a):"飽和砂の液状化特性に及ぼす異方圧密履歴の影響," 土質工学会北海道支部技術報告集, 第27号, pp.91-98.

92)山下聡・土岐祥介・三浦清一・三浦均也(1987b):"異方圧密履歴を受けた飽和砂の液状化特性," 第22回土質工学研究発表会講演集, pp.559-562.

93)山下聡・土岐祥介・三浦清一・縄田健志(1987c):"異方圧密履歴を受けた飽和砂の液状化特性(第2報)," 土木学会第42回年次学術講演会概要集, pp.126-127.

94)山下聡・土岐祥介・三浦清一(1986):"砂の非排水三軸挙動に及ぼすMembrane Penetrationの影響," 土木学会第41回年次学術講演会概要集, pp.279-280.

謝　辞

本論文は、筆者が北海道大学工学部土木工学科において昭和５９年に勤務以来の８年余りの研究成果を取りまとめたものである。本研究を進めるにあたって、多くの方々のご指導およびご援助を頂いた。

筆者は本研究を行う研究環境を与えて下さるとともにご指導を頂いた北海道大学土岐祥介教授に深く感謝いたします。

北海道大学三田地利之教授、澁谷啓助教授、三浦均也助教授には日頃から研究に対するご意見ご指導を頂きました。室蘭工業大学の三浦清一助教授には本研究の液状化特性に関する研究に関してご指導を頂きました。東京大学生産技術研究所龍岡文夫教授には貴重なデータの提供を頂きました。また、不攪乱試料の採取には、基礎地盤コンサルタンツ（株）札幌支社のご助力を頂きました。さらに、北海道大学基礎地盤工学講座および土質工学講座の諸兄および卒業生には、実験等においてお世話になりました。その他多くの方々のご指導および協力により本研究を行うことができました。ここに記して謝意を表します。

inches 1 2 3 4 5 6 7 8

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Kodak Gray Scale

C Y M

© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19