

JNC TN8400 99-042

緩衝材の動的力学特性

(研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転写する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地33

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194,

Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

緩衝材の動的力学特性

(研究報告)

報告者：高治 一彦*，谷口 航*

要 旨

緩衝材には、止水性、自己シール性、核種収着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性、応力緩衝性等が長期にわたり維持されることが期待されている。これらの機能を比較的満足し得る材料として、天然に産する粘土が注目され、中でも圧縮されたベントナイトは、非常に低い透水性による水の動きの抑制、水の浸潤に伴い膨張し圧縮ベントナイト中の間隙や隣接する岩盤中の割れ目への充填、陽イオン核種を収着する陽イオン交換能を有している等の点で優れており、緩衝材として最も有力であると考えられている。

サイクル機構では地層処分研究の一環として、人工バリア技術開発および安全評価の基礎データとするために緩衝材の特性に関する研究を進めている。

本報告書は、耐震安定性評価に資するための緩衝材としての圧縮ベントナイトの動的力学特性の把握を目的として、動的三軸試験、弾性波速度の測定、液状化試験についての手順、試験条件、結果および考察についてまとめたものである。

動的三軸試験により、せん断剛性および減衰比のせん断ひずみ依存性、力学モデルへの適用等、弾性波速度の測定により、動的三軸試験によって得られた最大せん断剛性の妥当性等、液状化試験により、繰返し載荷による動的強度等を把握することができた。

* 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

Dynamic Mechanical Properties of Buffer Material

Kazuhiko TAKAJI* and Wataru TANIGUCHI*

Abstract

The buffer material is expected to maintain its low water permeability, self-sealing properties, radionuclides adsorption and retardation properties, thermal conductivity, chemical buffering properties, overpack supporting properties, stress buffering properties, etc. over a long period of time. Natural clay is mentioned as a material that can relatively satisfy above. Among the kinds of natural clay, bentonite when compacted is superior because (i) it has exceptionally low water permeability and properties to control the movement of water in buffer, (ii) it fills void spaces in the buffer and fractures in the host rock as it swells upon water uptake, (iii) it has the ability to exchange cations and to adsorb cationic radioelements. In order to confirm these functions for the purpose of safety assessment, it is necessary to evaluate buffer properties through laboratory tests and engineering-scale tests, and to make assessments based on the ranges in the data obtained.

This report describes the procedures, test conditions, results and examinations on the buffer material of dynamic triaxial tests, measurement of elastic wave velocity and liquefaction tests that aim at getting hold of dynamic mechanical properties.

We can get hold of dependency on the shearing strain of the shearing modulus and hysteresis damping constant, the application for the mechanical model etc. by dynamic triaxial tests, the acceptability of maximum shearing modulus obtained from dynamic triaxial tests etc. by measurement of elastic wave velocity and dynamic strength caused by cyclic stress etc. by liquefaction tests.

* BARRIER PERFORMANCE GROUP
WASTE ISOLATION RESEARCH DIVISION

目 次

1. はじめに	1
2. 動的三軸試験	2
2.1 試験手法	2
2.1.1 試験概要	2
2.1.2 試験条件	3
2.1.3 試験手順	4
2.2 試験結果	5
2.2.1 供試体諸物性	5
2.2.2 動的ポアソン比	7
2.2.3 等価せん断剛性率, 履歴減衰定数	10
2.2.4 計測装置の比較	14
2.2.5 影響因子の検討	15
2.2.6 動的変形特性のモデル化	21
2.2.7 その他の条件における試験結果	43
3. 弾性波速度の測定	45
3.1 試験手法	45
3.1.1 試験概要	45
3.1.2 試験条件	45
3.2 試験結果	46
3.2.1 弾性波速度	46
3.2.2 ポアソン比	46
3.2.3 せん断剛性	47

4. 液状化試験	50
4.1 試験手法	50
4.1.1 試験概要	50
4.1.2 試験条件	50
4.1.3 試験手順	51
4.2 試験結果	52
4.2.1 供試体諸物性	52
4.2.2 繰返し載荷中の経時変化, 応力経路	53
4.2.3 動的強度の推定	63
5. まとめ	65
謝辞	67
参考文献	68

1. はじめに

緩衝材には、止水性、自己シール性、核種収着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性、応力緩衝性等が長期にわたり維持されることが期待されている。これらの機能を比較的満足し得る材料として、天然に産する粘土が注目され、中でも圧縮されたペントナイト（以下、圧縮ペントナイト）は、非常に低い透水性による水の動きの抑制、水の浸潤に伴い膨張し圧縮ペントナイト中の間隙や隣接する岩盤中の割れ目への充填、陽イオン核種を収着する陽イオン交換能を有している等の点で優れており、緩衝材として最も有力であると考えられている。

廃棄体設置後の緩衝材には、静的な外力が長期にわたって作用する他に、わが国のような地震の多い地質環境条件下での地層処分においては、地震外力が発生する可能性が高い。地震外力に対する人工バリアシステムの健全性を検討するためには、地震応答解析や安定性解析による評価が必要であるが、解析を行う上で重要な問題の一つは、入力条件としての緩衝材の動的変形特性、動的強度を室内試験などで適切に把握することである。

地震応答解析により振動特性を評価するためには、動的変形挙動の把握が不可欠である。一般に土質材料の応力～ひずみ関係は、発生するせん断ひずみ振幅に応じて強い非線形性を示し、実際上の問題を取り扱う場合には、この影響を無視することができない。よって、地震時の挙動を推定するための基本的な物性値であるせん断剛性率のひずみ依存性や減衰の大きさを把握するために動的三軸試験を実施した。また、微小ひずみレベルでの動的変形特性を把握するために弾性波速度の測定を行い、その結果から、動的三軸試験結果の妥当性についても検討した。

また、耐震安定性を評価するためには、動的強度の把握が不可欠である。土の動的強度とは、一般に載荷速度が大きく、かつ繰返し載荷があるときの強度を対象としている。載荷速度や繰返し載荷の影響の仕方は砂質土と粘性土で異なり、かつ排水条件によって異なる。砂質土では、繰返し三軸載荷により最終的に有効応力が 0 に至り、液状化（緩詰め状態の場合）もしくはサイクリックモビリティー（比較的密な砂に見られ、液状化ほど著しい破壊ではなく、有効応力の低下により徐々に変形が増大してゆく現象）を起こす。一方、粘性土においては塑性指数の大きい試料では、有効応力経路は 0 からより遠い位置で定常になり、大きな剛性を残しながら大きな変形が発達してゆく繰返しせん断破壊を起こす¹⁾。緩衝材、特に今回対象としたクニゲル V1 は、塑性指数が約 400%²⁾と著しく大きい材料であり、破壊のタイプは繰返しせん断破壊であると考えられ、砂のような液状化やサイクリックモビリティーのタイプのような破壊は起こりにくいと考えられる。しかし、破壊タイプの検討も含め実験的、解析的に耐震安定性を検討することは非常に重要であることから、繰返し載荷による動的強度を把握するために繰返し三軸試験を実施した。

本報告書は、上記の動的特性試験に関してまとめたものである。以下の各章は、2 章に変形特性を求めるための動的三軸試験（以下、“動的三軸試験”と称する）、3 章に弾性波速度の測定、4 章に動的強度を把握するための繰返し三軸試験（以下、一般には液状化強度特性を求めるために行われる場合が多い試験であることから“液状化試験”と称する）について記す。

2. 動的三軸試験

2.1 試験手法

2.1.1 試験概要

動的三軸試験は、軸対称応力境界条件下で、材料の動的変形特性を調べる要素試験である。動的三軸試験において、供試体に作用する応力、ひずみの概念を図 2-1に示す。今回行った、圧密非排水動的三軸試験は、 σ_a （軸応力）= σ_r （側方応力）= σ_c （圧密応力）を負荷して等方圧密した後、水の出入りを許さない非排水状態で σ_r を一定に保ち、軸差応力振幅土 $\Delta \sigma_a$ を数回与えることにより求まるせん断応力とせん断ひずみの履歴曲線から動的変形特性を調べるものである。今回の試験のような非排水せん断試験の場合、せん断中供試体内の体積は一定となる。

本試験は振動三軸変形試験装置を用いて行った。装置の概要断面図を図 2-2に示す。本試験装置は、電気油圧サーボ式のアクチュエータにより軸差応力振幅を与える。振動載荷中の側圧は一定に制御される。また、ひずみを局所ひずみ計測装置（Local Displacement Transducer：以下 L.D.T）とギャップセンサーにより計測が可能である。

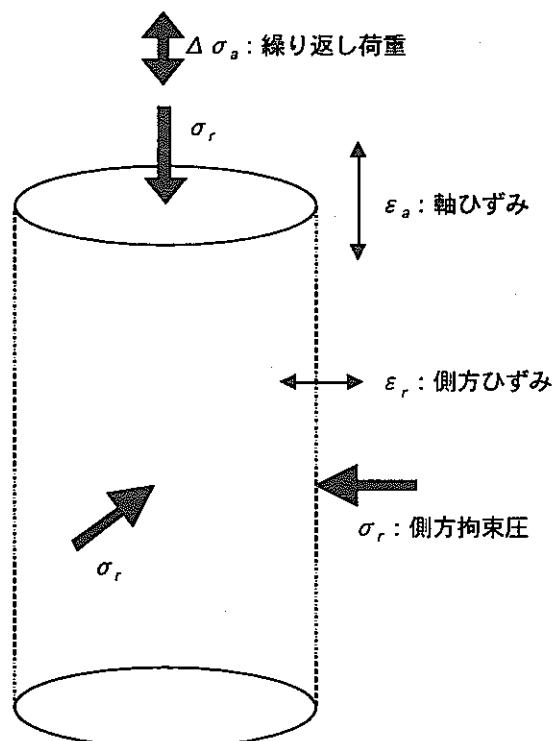


図 2-1 動的三軸試験概念図

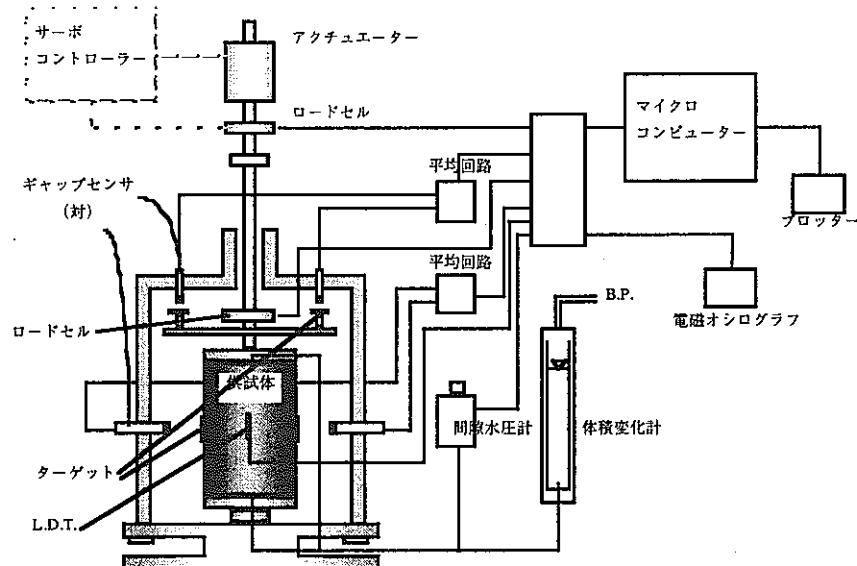


図 2-2 動的三軸試験装置概要図

2.1.2 試験条件

試験は、乾燥密度 1.6Mg m^{-3} と 1.8Mg m^{-3} のペントナイト単体、乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のケイ砂混合体（ケイ砂混合率 30wt%）の飽和条件および不飽和条件で行った。供試体寸法は直径 50mm、高さ 100mm である。また、有効拘束圧 σ'_c は、飽和条件については、各仕様における膨潤応力相当近傍（乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のペントナイト単体は約 0.98, 1.96, 2.94MPa, 1.8Mg m^{-3} のペントナイト単体は約 2.94, 3.92, 4.41MPa, 乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のケイ砂混合体は約 0.297, 0.49, 0.686MPa）の 3 ケース、不飽和条件については、オーバーパックの自重相当（全てのケースにおいて 0.098, 0.196MPa の 2 ケース）および、参考ケースとしてペントナイト単体のみ約 4.41MPa についても行った。

軸力の載荷は軸差応力振幅を制御する応力制御により行った。軸差応力振幅は、1 供試体に対してひずみの小さいほうから大きいほうへ 10 段階程度変化させるステージ方式により載荷した。また、1 段階につき $0.2\text{Hz} \sim 0.5\text{Hz}$ 程度の正弦波を 10 回程度加え、5 波目、10 波目のヒステリシスループでデータ処理を行った。試験方法、手順などは地盤工学会基準³⁾JGS T542 に準拠している。

• 供試体仕様

材 料 : ペントナイト単体、ケイ砂混合体（ケイ砂混合率 30wt%）

ケイ砂混合ペントナイトの配合比

: ペントナイト クニゲル V1 (70wt%)

ケイ砂 3 号 (15wt%)

5 号 (15wt%)

寸 法 : 直径 $\phi = 50\text{mm}$, 高さ $h = 100\text{mm}$

初期乾燥密度 : 1.6Mg m^{-3} (ペントナイト単体, ケイ砂混合体)

1.8Mg m^{-3} (ペントナイト単体)

飽和条件 : 飽和, 不飽和

- 試験条件 (圧密条件, 載荷条件) : 表 2-1参照

表 2-1 圧密条件, 載荷条件

供試体仕様		ペントナイト単体								
所定乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)		1.6					1.8			
飽和条件		飽和			不飽和			飽和		
圧密 条件	有効拘束圧 σ'_c (MPa)	0.98	1.96	2.94	0.098	0.196	4.41	2.94	3.92	4.41
	側圧 (MPa)	1.176	2.156	3.136	0.098	0.196	4.41	3.136	4.116	4.606
	背圧 (MPa)	0.196	0.196	0.196	0	0	0	0.196	0.196	0.196
載荷 条件	載荷波形	正弦波								
	載荷周波数 f (Hz)	0.5	0.2							
供試体仕様		ペントナイト単体			ケイ砂混合体					
所定乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)		1.8			1.6					
飽和条件		不飽和			飽和			不飽和		
圧密 条件	拘束圧 σ'_c (MPa)	0.098	0.196	4.41	0.294	0.49	0.686	0.098	0.196	
	側圧 (MPa)	0.098	0.196	4.41	0.49	0.686	0.882	0.098	0.196	
	背圧 (MPa)	0	0	0	0.196	0.196	0.196	0	0	
載荷 条件	載荷波形	正弦波								
	載荷周波数 f (Hz)	0.2								

2.1.3 試験手順

(1) 試料調整

①ペントナイト単体

(飽和試料, 不飽和試料共) 粉末のペントナイトを含水比 10%になるように水を霧吹きで散布し, 十分に混合する。混合後は, 水がペントナイトに十分行きわたるように 24 時間放置する。

②ケイ砂混合体

(飽和試料, 不飽和試料共) 自然含水比の粉末ペントナイトとケイ砂を重量比 7 : 3 の割合で十分に混合する。

(2) 圧縮固化

混合した試料の設定した乾燥密度に必要な湿潤重量を測定, 圧縮固化体製作治具に投入して, 一軸圧縮試験装置を用い, 圧縮応力 10MPa 前後で供試体直径 50mm, 高さ 100mm なるよう静的に固化させる。

(3) 飽和過程（飽和供試体のみ）

圧縮固化した供試体の飽和作業は、以下の方法で行った。

- ①供試体を飽和セルにろ紙を介して設置する。
- ②上下から真空度を徐々に高めていき、負圧（約-0.1MPa）の状態で24時間保持する。
- ③負圧を徐々に解除して、上下から吸水させた後、通水圧約0.7MPaで30日以上吸水させる。

(4) 供試体の設置

飽和セルから供試体を取り出した後、ろ紙を外し、直径、高さ、重量を測定して、図2-2に示す振動三軸変形試験装置に設置した。手順は以下の通りに行った。

- ①ポーラスストーンと一体となったペデスタル上にろ紙を敷き、供試体を置く。
- ②供試体側面には、新たにろ紙を巻き、上端面にろ紙を敷く。
- ③供試体にゴムスリーブをかぶせ三軸セル内にセットし、上下のゴムスリーブをシールする。
- ④供試体側面に軸ひずみ測定のためのストレインゲージ型供試体局所ひずみ測定装置（L.D.T.）を設置する。また、周方向、軸方向ギャップセンサを設置する。
- ⑤上下端面からの排水設備のセットを行う。
- ⑥三軸セルをセットし、セル内に水を充満させる。

なお、不飽和供試体についても、基本的には同じ手順で設置した。

(5) 圧密過程

供試体を三軸セルに設置した後上下のコックを開けて排水条件とし、側圧に所定の有効拘束圧をかけて圧密を開始する。圧密の終了は3t法により判定した。また、飽和供試体に関しては圧密終了後、B値を測定した。

(6) 載荷過程とデータ処理方法

圧密過程終了後非排水状態にして、軸差応力振幅を制御する応力制御により動的応力の載荷を行った。軸差応力振幅は、1供試体に対して、ひずみの小さい方から大きい方へ10段階程度変化させるステージ方式により載荷し、0.2Hz～0.5Hz程度の正弦波を10回程度載荷し、5波目、10波目のヒステリシスループでデータを処理した。

2.2 試験結果

2.2.1 供試体諸物性

表2-2に、各供試体の初期状態(三軸セルセット前)および圧密過程の諸物性一覧を示す。

圧密終了後に測定されたB値は、地盤工学会基準では0.95以上を目安としているが、飽和ベントナイト単体供試体は0.90～0.92と若干下回った。しかし、本飽和方法ではこれ以上B値を上げることは困難であり、また、飽和セル取り出し後の簡易的な飽和度の計算ではほぼ100%に到達していることから、この状態で三軸試験を行うこととした。

表 2-2 初期状態および圧密過程の物性一覧

供試体仕様		ペントナイト単体							
所定乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)		1.6				1.8			
飽和条件		飽和		不飽和		飽和			
有効拘束圧 σ_c' (MPa)	0.98	1.96	2.94	0.098	0.196	4.41	2.94	3.92	4.41
初期状態	直径 D_0 (cm)			4.96	4.99	4.97			
	高さ H_0 (cm)			9.90	9.99	9.97			
	体積 V_0 (cm ³)			191.29	195.37	193.42			
	湿潤重量 W_w (g)			337.90	343.90	342.40			
	乾燥重量 W_d (g)			307.09	310.80	309.89			
	含水比 ω (%)	28.6	27.4	26.5	10.0	10.6	10.5	20.8	20.8
	湿潤密度 ρ_t (Mg m ⁻³)	1.683	1.727	1.749	1.766	1.760	1.770	1.925	1.914
	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	1.532	1.566	1.590	1.605	1.591	1.602	1.752	1.740
	間隙比 e_0	0.765	0.720	0.698	0.682	0.697	0.685	0.543	0.534
圧密過程	飽和度 Sr (%)	101.3	102.2	102.5	39.7	41.2	41.3	103.9	102.3
	軸変位 Δh (cm)	0	0.079	0.136	0.009	0.008	0.049	0	0.029
	体積変化 Δv (cc)	5.0	11.3	14.5	0.5	0.8	1.2	6.4	8.8
	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	1.571	1.660	1.714	1.610	1.597	1.612	1.811	1.820
	間隙比 e_c	0.720	0.627	0.579	0.677	0.690	0.675	0.492	0.484
	B 値	0.90	0.92	0.90	—	—	—	0.90	0.90
初期状態	圧密時間 (hr.)	192	422	764	1	1	1	552	976
供試体仕様		ペントナイト単体				ケイ砂混合体			
所定乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)		1.8				1.6			
飽和条件		不飽和				飽和		不飽和	
有効拘束圧 σ_c' (MPa)	0.098	0.196	4.41	0.294	0.49	0.686	0.098	0.196	
直径 D_0 (cm)	4.98	4.98	5.00	5.01	5.01	5.02	4.99	4.98	
高さ H_0 (cm)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.01	10.03	10.01	9.97	
体積 V_0 (cm ³)	194.78	194.78	196.35	197.14	197.33	198.52	195.76	194.20	
湿潤重量 W_w (g)	385.30	383.20	398.10	391.60	395.50	395.10	323.40	323.70	
圧密過程	乾燥重量 W_d (g)	350.27	347.42	353.85	305.12	310.23	310.29	307.74	307.63
	含水比 ω (%)	10.0	10.3	10.0	28.3	27.5	27.3	5.1	5.2
	湿潤密度 ρ_t (Mg m ⁻³)	1.978	1.967	1.982	1.986	2.004	1.990	1.652	1.667
	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	1.798	1.784	1.802	1.548	1.572	1.563	1.572	1.584
	間隙比 e_0	0.501	0.514	0.498	0.706	0.679	0.689	0.679	0.667
	飽和度 Sr (%)	53.8	54.1	54.0	106.0	106.8	104.7	19.8	20.7
	軸変位 Δh (cm)	0.005	0.007	0.020	0.01	0.015	0.091	0.014	0.017
	体積変化 Δv (cc)	0.5	0.5	2.5	2.7	5.6	8.4	0.2	0.4
	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	1.803	1.788	1.825	1.569	1.618	1.632	1.574	1.587
	間隙比 e_c	0.498	0.510	0.479	0.682	0.632	0.618	0.678	0.663
	B 値	—	—	—	0.96	0.96	0.98	—	—
	圧密時間 (min)	0.5	0.5	0.5	184	142	170		

2.2.2 動的ポアソン比

各試験ケースについて、応力振幅の各載荷段階における片振幅軸ひずみ ϵ_a と動的ポアソン比 ν_d の関係を図 2-3(a)～(f)に示す。

動的ポアソン比は、周方向ギャップセンサにより得られた周ひずみを L.D.T. と軸方向ギャップセンサにより得られた軸ひずみで除して算出し、各試験ケースについて両者によって得られたものを図示している。

図より、全体的に 5 波目と 10 波目では動的ポアソン比に大きな差は見られず、連続する繰り返しサイクルによって、圧縮または伸張が進展することはなかった。これは、後述するせん断ひずみと等価せん断剛性率、履歴減衰定数との関係からも確認出来る。

飽和条件の全てのケースについては、せん断ひずみレベルや拘束圧によらず、動的ポアソン比は 0.5 に近い値でほぼ一定値となり、また、L.D.T. とギャップセンサによる値の差もほとんど見られなかった。一般に、非排水状態での飽和土の動的ポアソン比は、0.5 に近い値を示すことから、この結果は妥当であると言える⁴⁾。

不飽和条件ではベントナイト単体、 $\sigma'_c=4.41\text{ MPa}$ の高拘束圧のケースは、L.D.T.、ギャップセンサー共、 $\rho d=1.6, 1.8\text{ Mg m}^{-3}$ の両乾燥密度条件で動的ポアソン比は 0.2 前後となり、せん断ひずみが大きくなるにつれて、多少増加する同様の挙動となったが、低拘束圧 ($\sigma'_c=0.098, 0.196\text{ MPa}$) のケースでは、動的ポアソン比は 0 近く～0.3 の間でばらつき、L.D.T.、ギャップセンサー間で大きく異なる値となった。これは、低拘束圧条件では、供試体の変形にゴムスリープの変形が十分に追従せず、ゴムスリープの外側に貼付している L.D.T. の計測に多少不備があったこと、また、低拘束圧条件であることに加えて不飽和条件であったことから、周方向ギャップセンサも十分に追従しなかったことなどが相互に影響し、このようななばらつきが生じたものと思われる。後述するせん断ひずみとせん断剛性率の関係も、不飽和、低拘束圧条件では L.D.T. とギャップセンサで大きく異なるため、データの信頼性にはやや欠けると言わざるを得ない。

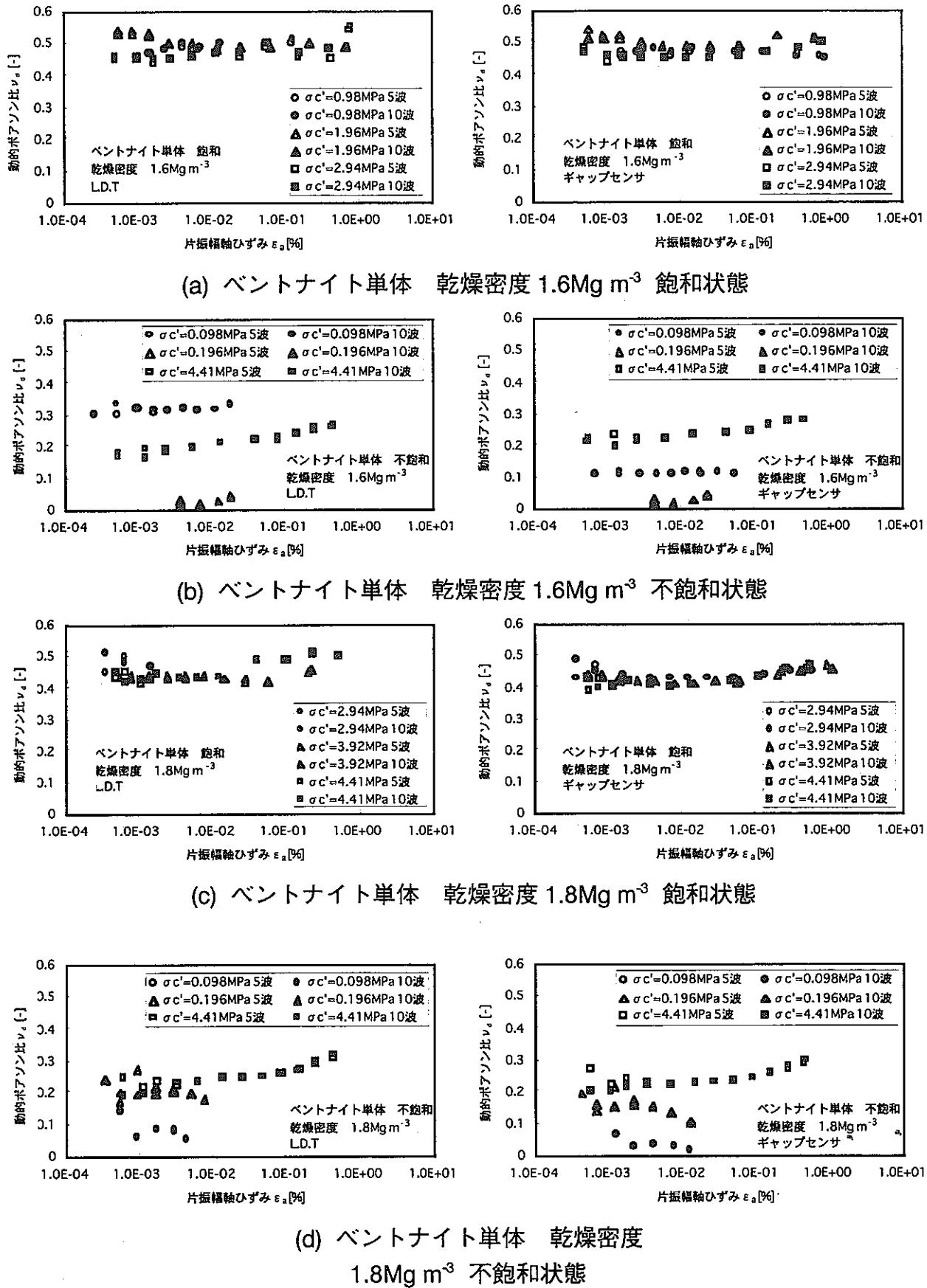
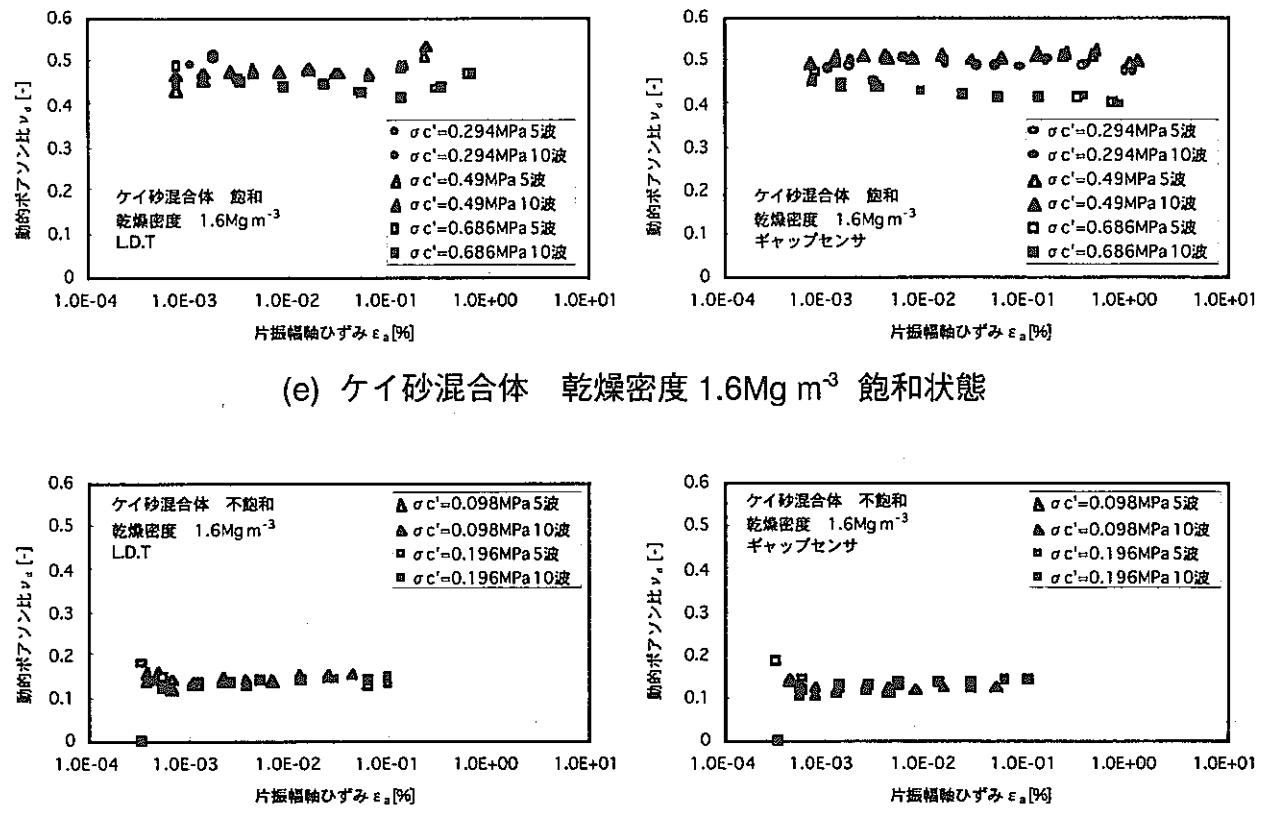


図 2-3 動的ポアソン比測定結果（左図:L.D.T. 右図:ギャップセンサ）(1/2)



2.2.3 せん断剛性率、減衰定数

各載荷ステージより得られた、片振幅軸ひずみ ϵ_a (%)と片振幅軸応力 σ_a (MPa)の関係から、せん断ひずみ γ (%), 等価せん断剛性率 G (MPa)を次式により算出する。

$$\gamma = (1 + \nu) \epsilon_a \quad (2-1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{\sigma_a}{2(1+\nu) \cdot \epsilon_a} \quad (2-2)$$

また、履歴減衰定数 h (%)は $\epsilon_a \sim \sigma_a$ 履歴曲線（図 2-4）より、次式で算定する。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad (2-3)$$

ここで、 ΔW は減衰エネルギーで、1回の繰り返し載荷中に、熱・音等になって失われるエネルギーであり、図示のように履歴曲線で囲まれる面積で求められる。また、 W は、その繰り返し載荷サイクルでの等価弾性エネルギーである。

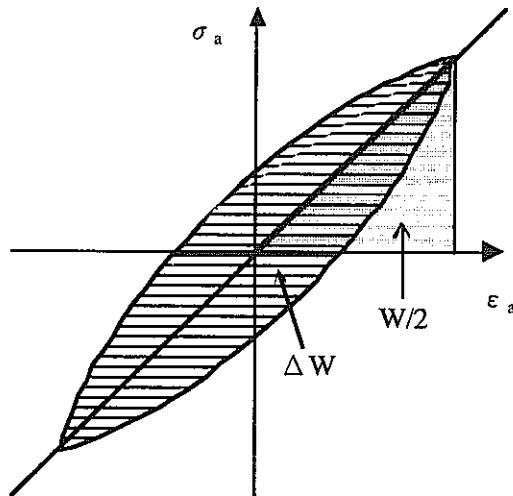


図 2-4 $\epsilon_a \sim \sigma_a$ 履歴曲線模式図

得られたせん断ひずみ γ [%]と等価せん断剛性率 G [MPa], 履歴減衰定数 h [%]の関係を図 2-5(a)～(f)に示す。各ケースにおいて、L.D.T., ギャップセンサによる5波目と10波目それぞれについて示す。なお、動的ポアソン比は前述の結果から、飽和条件では $\nu=0.5$, 不飽和条件では各ケースでばらついたが、ほぼ平均値として全てのケースにおいて、 $\nu=0.2$ とした。図より、5波目と10波目（左図と右図の比較）では2.2.2でも述べたように、連続する繰り返しサイクルによって圧縮または伸張が進展することがほとんどなく、両者はほとんど同じ値を示している。

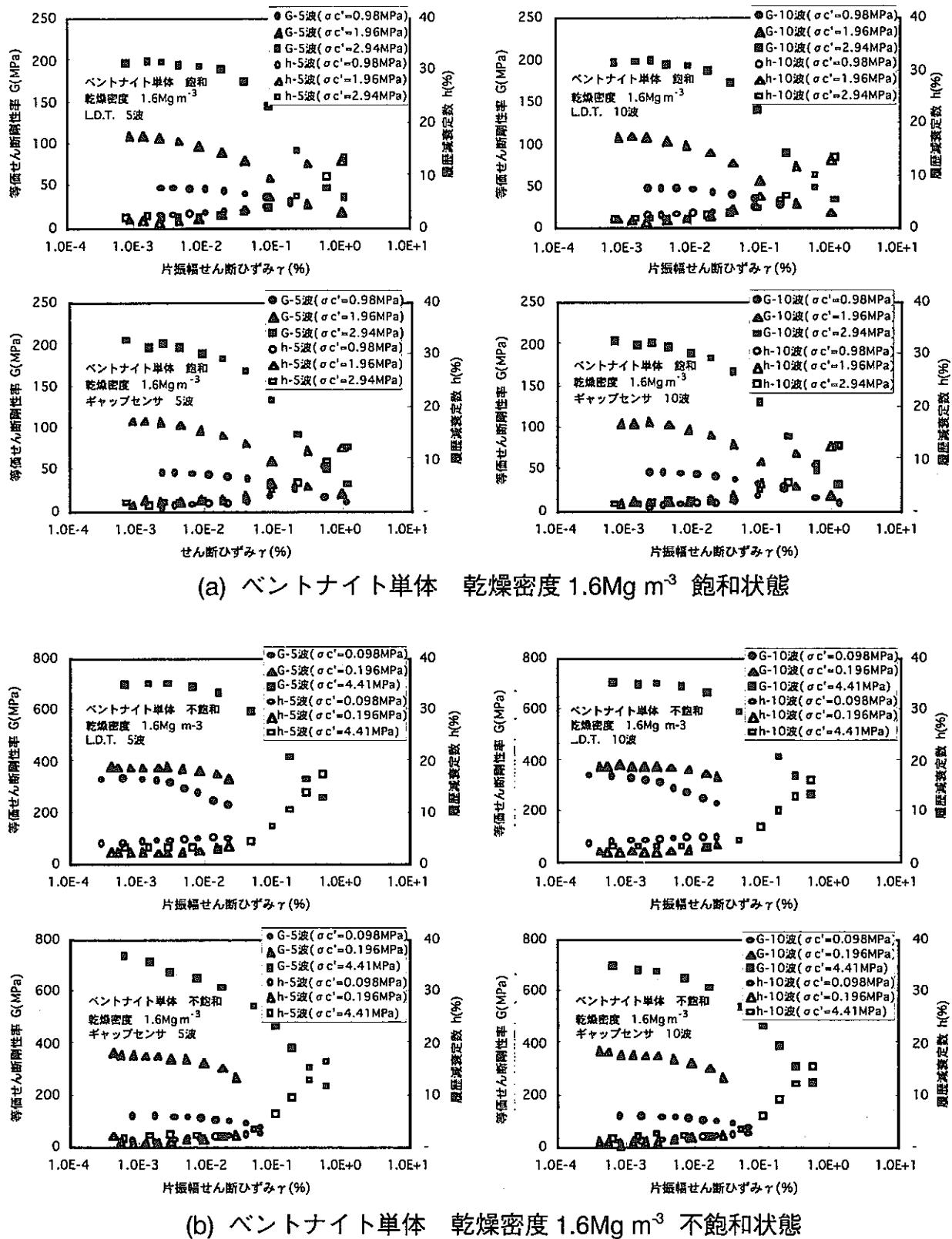


図 2-5 せん断ひずみと等価せん断剛性率、履歴減衰定数の関係 (1/3)

(上段左図:L.D.T.-5 波 上段右図:L.D.T.-10 波

下段左図:ギャップセンサ-5 波 下段右図:ギャップセンサ-10 波)

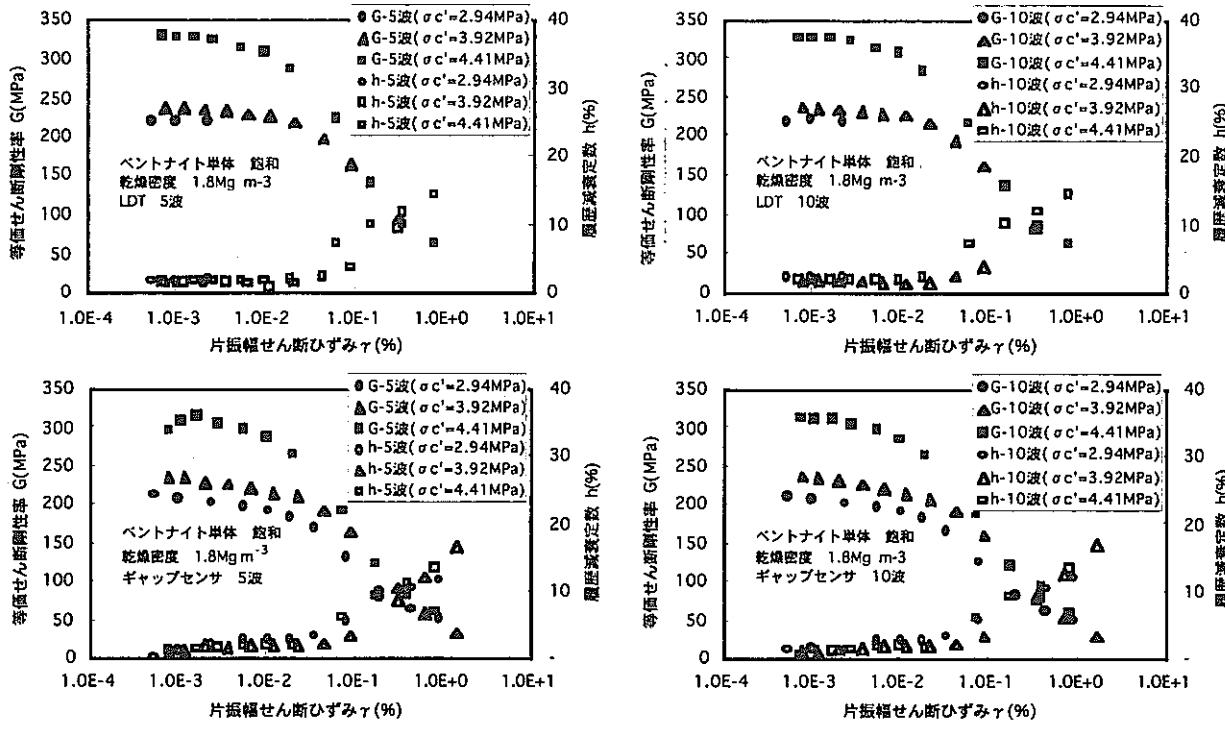
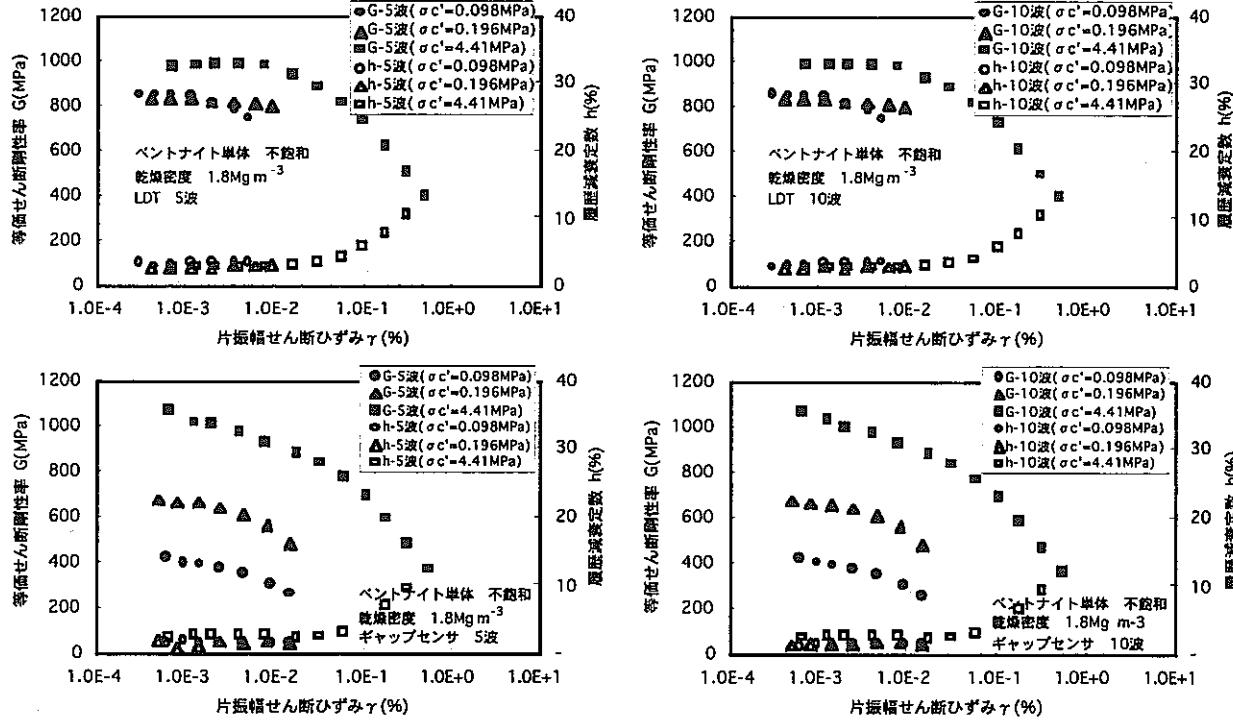
(c) ベントナイト単体 乾燥密度 1.8Mg m^{-3} 鮎和状態(d) ベントナイト単体 乾燥密度 1.8Mg m^{-3} 不鮎和状態

図 2-5 せん断ひずみと等価せん断剛性率、履歴減衰定数の関係 (2/3)

(上段左図:L.D.T.-5 波 上段右図:L.D.T.-10 波

下段左図:ギャップセンサ-5 波 下段右図:ギャップセンサ-10 波)

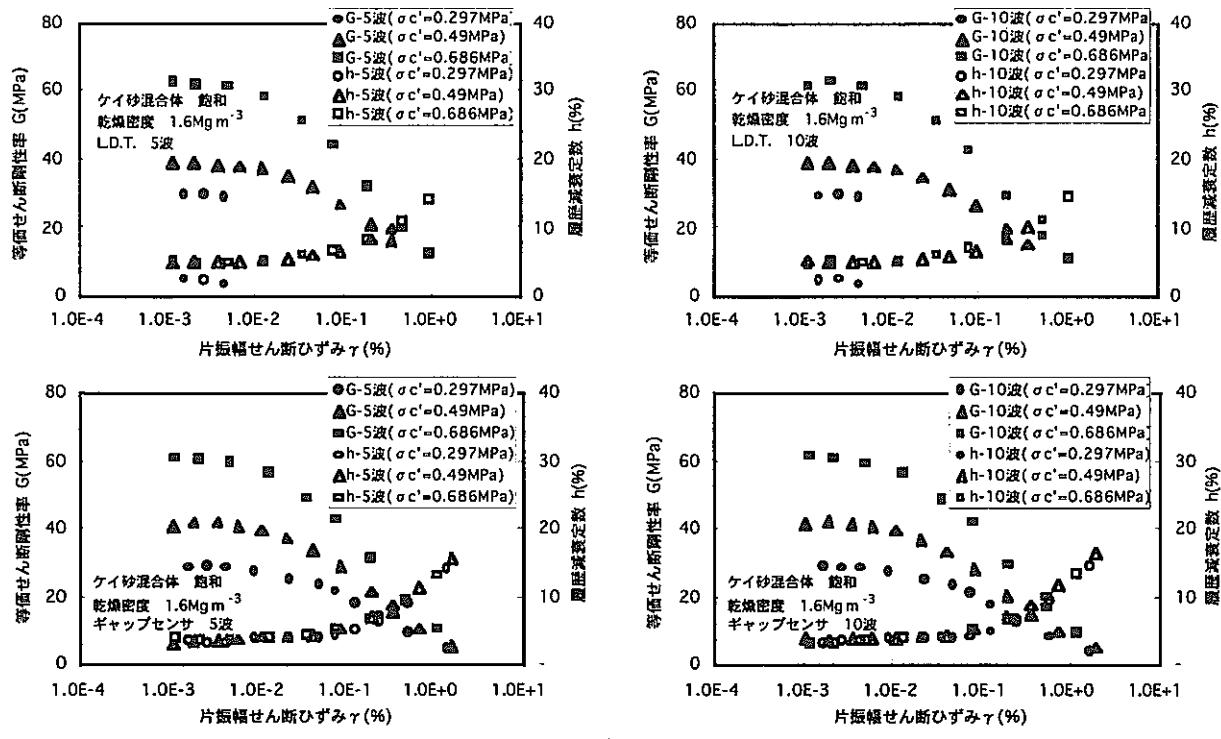
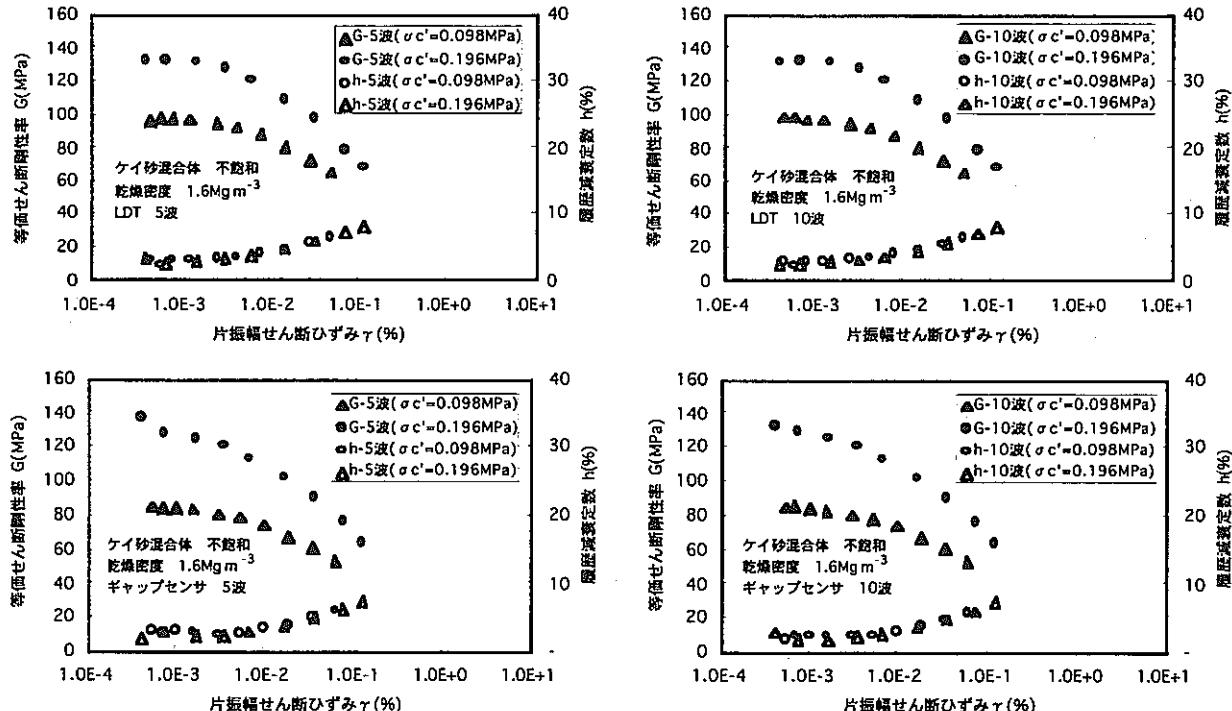
(e) ケイ砂混合体 乾燥密度 1.6Mg m^{-3} 飽和状態(f) ケイ砂混合体 乾燥密度 1.6Mg m^{-3} 不飽和状態

図 2-5 せん断ひずみと等価せん断剛性率、履歴減衰定数の関係 (3/3)

(上段左:L.D.T.-5 波 上段右:L.D.T.-10 波

下段左:ギャップセンサ-5 波 下段右:ギャップセンサ-10 波)

2.2.4 計測装置の比較

得られた結果より、L.D.T.とギャップセンサ（各ケースの上段図と下段図）の計測値の比較について検討する。図 2-6は、L.D.T.とギャップセンサによる 10 波目のせん断ひずみ、等価せん断剛性率、履歴減衰定数の計測値を全データについてまとめたものである。せん断ひずみ、等価せん断剛性率については図中に、両計測装置により大きな差が生じたケースのみプロットに色を付けて示している。せん断ひずみと等価せん断剛性率については、2.2.2でも述べたように、おそらく L.D.T.とギャップセンサの計測に多少不備があったと思われる図中の色を付けたケース以外については、両計測装置の結果がほぼ 1 対 1 で対応している。

一般に、外部変位計による軸ひずみは、ベディングエラーの影響により L.D.T.による軸ひずみに比べて過大評価となる⁵⁾。ベディングエラーとは、供試体上下端付近の緩みの変形や供試体とキャップ・ペデスタル面との間の不完全接触のために生じる「キャップや載荷ピストンの軸変位から求めた軸ひずみ」に含まれる測定誤差のことである。ベディングエラーは

- (a) 硬質な地盤材料の不攪乱試料を整形したときに供試体上下端面に相対的に緩い層が形成される
- (b) 硬質な地盤材料の供試体の上下端面の平滑性とキャップ・ペデスタルとの平行性が悪いことによる不完全接触による過大な軸圧縮
- (c) 供試体の上下端面にろ紙やグリースとメンブレンを用いた摩擦軽減層を用いた場合のその圧縮

などのメカニズムによって生じる⁶⁾。

今回の試験で用いたベントナイト供試体は拘束容器を用いた圧縮成型体であることから、供試体端部のゆるみが小さく、供試体の平行性も保たれており、また、おそらく圧密段階で上下端面のろ紙が十分に圧縮されたことから、前述の一部のケースを除いて、L.D.T.とギャップセンサ間のひずみ量にはほとんど差が生じなかったと考えられる。しかし、履歴減衰定数に関しては、特にばらつきの影響が小さくなつたと考えられる 5%以上の関係に着目すると、ギャップセンサより L.D.T.の方が一様に 1 対 1 の関係を僅かではあるが L.D.T.側にシフトさせた関係となっているのが分かる。外部変位計のベディングエラーの影響が顕著であれば、外部変位計による履歴減衰定数の方が大きくなる⁵⁾が、逆の結果となつたことから、今回の試験ではギャップセンサによるベディングエラーがほとんどなかつたことに加え、今回用いたギャップセンサもしくは L.D.T.固有の特性によりこのような結果となつたと考えられる。もしそうであれば測定値をキャリブレーションする必要があるが、原因が特定できないことや、両者の差が 2 %に満たないことから、特にデータの補正是行わなかつた。

以上のことから圧縮成型ベントナイト供試体を用いた三軸試験を行う場合は、端面を丁寧に仕上げ、拘束圧がある程度高ければ、ひずみの計測は外部変位計でも十分信頼性のあるデータを得られると言える。

2.2.5 影響因子の検討

変形メカニズムを考えるうえで、変形挙動に関わる影響因子を明らかにすることは重要であると考えられる。ここで言う影響因子とは、せん断ひずみ振幅、有効拘束圧、間隙比、時間効果、繰返し載荷回数、周波数、過圧密比、粒度分布、飽和度などである。土質材料のせん断変形挙動に対する影響についてはさまざまな検討が行われている⁷⁾⁸⁾が、ペントナイト材料について既往の検討結果が当てはまるかどうかを検討する。今回の試験で検討可能な影響因子は(1)せん断ひずみ振幅、(2)有効拘束圧、(3)間隙比(密度)、(4)粒度分布(今回の場合は、ケイ砂混合の有無を指す)、(5)飽和度(飽和or不飽和)である。

図2-5より、全てのケースで等価せん断剛性率や履歴減衰定数はひずみ依存性が認められ、ペントナイトの動的特性は、せん断ひずみ振幅の増加に伴い等価せん断剛性率が減少し、履歴減衰定数が増加する土質材料一般の非線形性と同様な傾向を示していることが分かる。また、等価せん断剛性率、履歴減衰定数それぞれの変化の度合いは、せん断ひずみ振幅が10⁻²%を越えたあたりで急激になっている。

各試験結果より求めたせん断ひずみの比較的小さな領域($\gamma=10^{-4}$ %程度)における正規圧密粘土の剛性率(以下、 $\gamma=10^{-4}$ %における剛性率をG_{max}と記す)と有効拘束圧との関係をギャップセンサ、L.D.T.それぞれによって得られた結果(10波目)について図2-7に示す。図より、低い拘束圧条件下で行った不飽和供試体の試験はギャップセンサ、L.D.T.間で若干差があり、ペントナイト単体については有効拘束圧が1~3MPa程度の中間の結果も無いことから、直線で近似することが妥当ではないが有効拘束圧が0の場合でもG_{max}はある値を有することは明白である。また、飽和供試体については、初期乾燥密度が異なるペントナイト単体およびケイ砂混合体で、それぞれ原点を通る固有の直線で近似される。 $\rho_d=1.6\text{ MPa}$, 1.8 MPa のペントナイト単体、 $\rho_d=1.6\text{ MPa}$ のケイ砂混合体各々の圧密降伏応力は、 1.5 MPa , 4.7 MPa , 0.8 MPa で⁹⁾¹⁰⁾、今回行った飽和供試体の有効拘束圧条件は一部を除きこれより低い過圧密状態であったと予想される。善ら¹¹⁾は、塑性指数Ipが30以上の試料では(ペントナイトの塑性指数は約400であり、これに相当する)、正規圧密状態の粘性土の σ'_c とG_{max}の関係は直線で近似できるが、 σ'_c が小さい領域では過圧密の影響が及び、直線から上方に外れると述べているが、今回の試験はほぼ過圧密状態であったにもかかわらず、原点を通る直線で近似できた。これは、ペントナイトの圧密降伏応力は膨潤応力より若干大きいところにあるが、膨潤応力は供試体の作成方法や形状等により大きくばらつくため、今回の飽和条件の試験が実際に過圧密領域であったかどうか不明瞭であること、ペントナイト供試体は乾燥状態で圧縮成型し飽和させるという特殊な作成方法をとるため厳密な過圧密の定義と異なることが要因と考えられる。いずれにしろペントナイトは、膨潤応力より高い有効拘束圧条件で σ'_c とG_{max}は原点を通る直線で近似されるため、任意の有効拘束圧におけるG_{max}を推定することが可能であると思われる。また、図よりペントナイト単体よりケイ砂混合体の方が直線の傾きが大きいが、これは、ケイ砂混合体の方が一軸圧縮試験による強度や剛性が若干低い結果と相反する。ケイ砂混合体の有効拘束圧条件の方がペントナイト単体に比べて低いためと思われるが両者の差は僅かであり、ペントナイト単体と同じ拘束圧条件で試験を行えば、同じ直線で近似できる可能性もある。

次に、それぞれの G を G_{\max} で無次元化した剛性比 G/G_{\max} とせん断ひずみの関係および履歴減衰定数とせん断ひずみの関係を、飽和、不飽和条件ごとにまとめたもの（ギャップセンサ、L.D.T.10 波目）を図 2-8、図 2-9に示す。図より、ある程度の幅はあるものの、いずれもほぼ同じ挙動を示しているように思われる。有効拘束圧、飽和条件の影響をより詳細に検討するために、代表的なせん断ひずみレベル ($\gamma = 0.001\%, 0.01\%, 0.1\%, 1.0\%$) ごとの有効拘束圧と剛性比 G/G_{\max} の関係、有効拘束圧と履歴減衰定数の関係を図 2-10、図 2-11に示す。図 2-10より、再三述べるように低拘束圧、不飽和条件の値は若干ばらつくものの、広い拘束圧条件で各ひずみレベルでの G/G_{\max} は有効拘束圧の違いによる相違は見られず、飽和／不飽和、密度の違い、ケイ砂混合の有無によらず、ほぼ一定の範囲に収まっている。また、 $\gamma = 1\%$ まで測定したのは飽和条件だけであるが、大ひずみ領域で有効拘束圧によらず剛性低下率が収束している点は注目すべきである。履歴減衰定数は、図 2-11より、剛性率の結果に比べて全体としての結果のばらつきが大きい傾向にあるが、剛性率同様、飽和／不飽和、密度の違い、ケイ砂混合の有無によらず、ほぼ一定の範囲に収まっていると言える。これらの結果は、塑性指数 I_p が 30 以上の粘性土に関しては剛性比 G/G_{\max} 、履歴減衰定数が有効拘束圧の影響をあまり受けないという善らの見解と一致する¹¹⁾。

以上の結果は、飽和／不飽和、密度の違い、ケイ砂混合の有無による σ'_c と G_{\max} の関係さえ明らかにすれば、ベントナイト材料の任意の有効応力条件下でのせん断ひずみとせん断剛性率の関係が（ある程度の幅の範囲ではあるが）推測できることを示唆する。ただし、一般には粘性土の動的変形挙動は時間効果（圧密時間）、繰返し載荷回数、周波数、過圧密比等の影響および試験方法の違いによる影響を受けるので⁷⁾、一義的に決まるものではない。

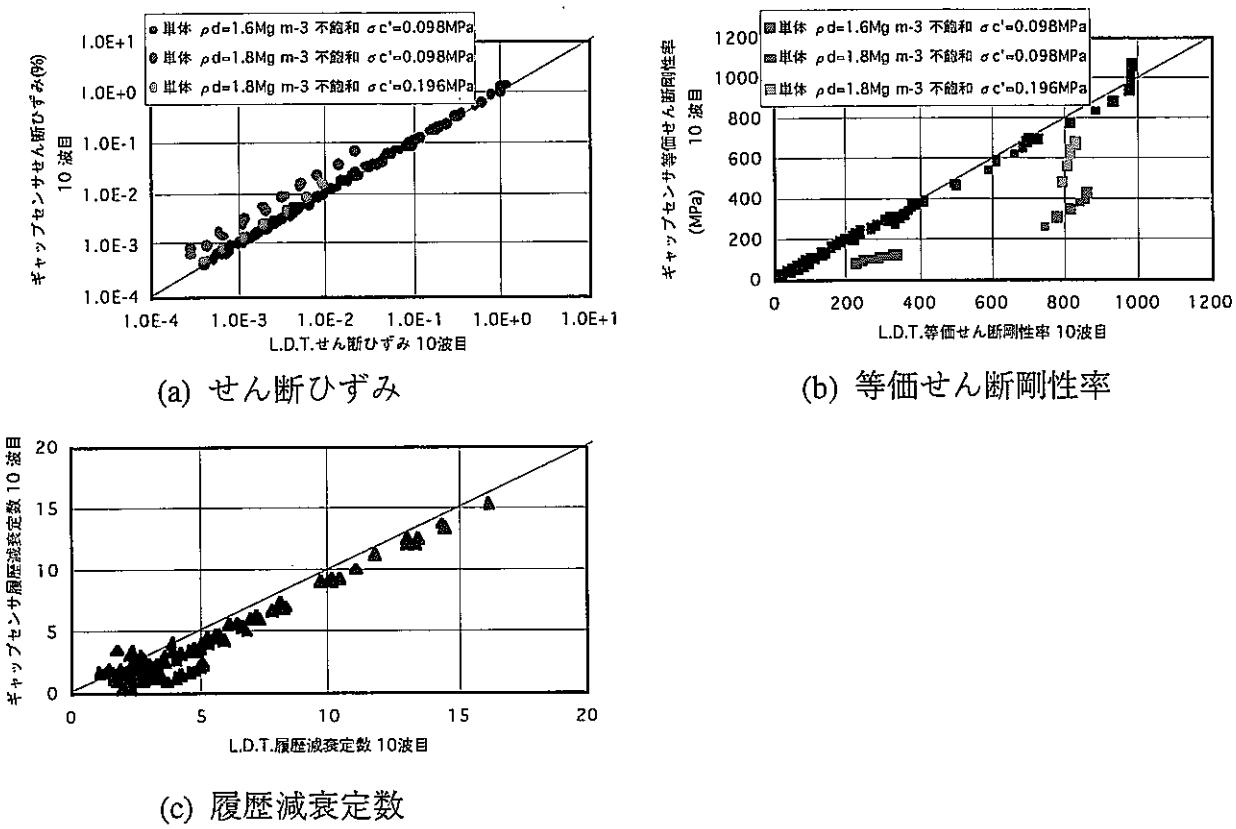


図 2-6 L.D.T. とギャップセンサの計測値の比較

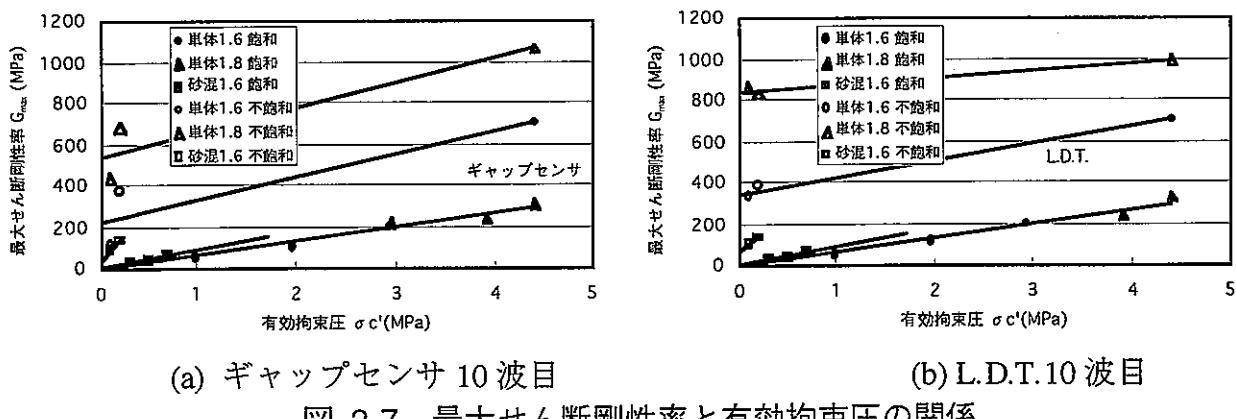
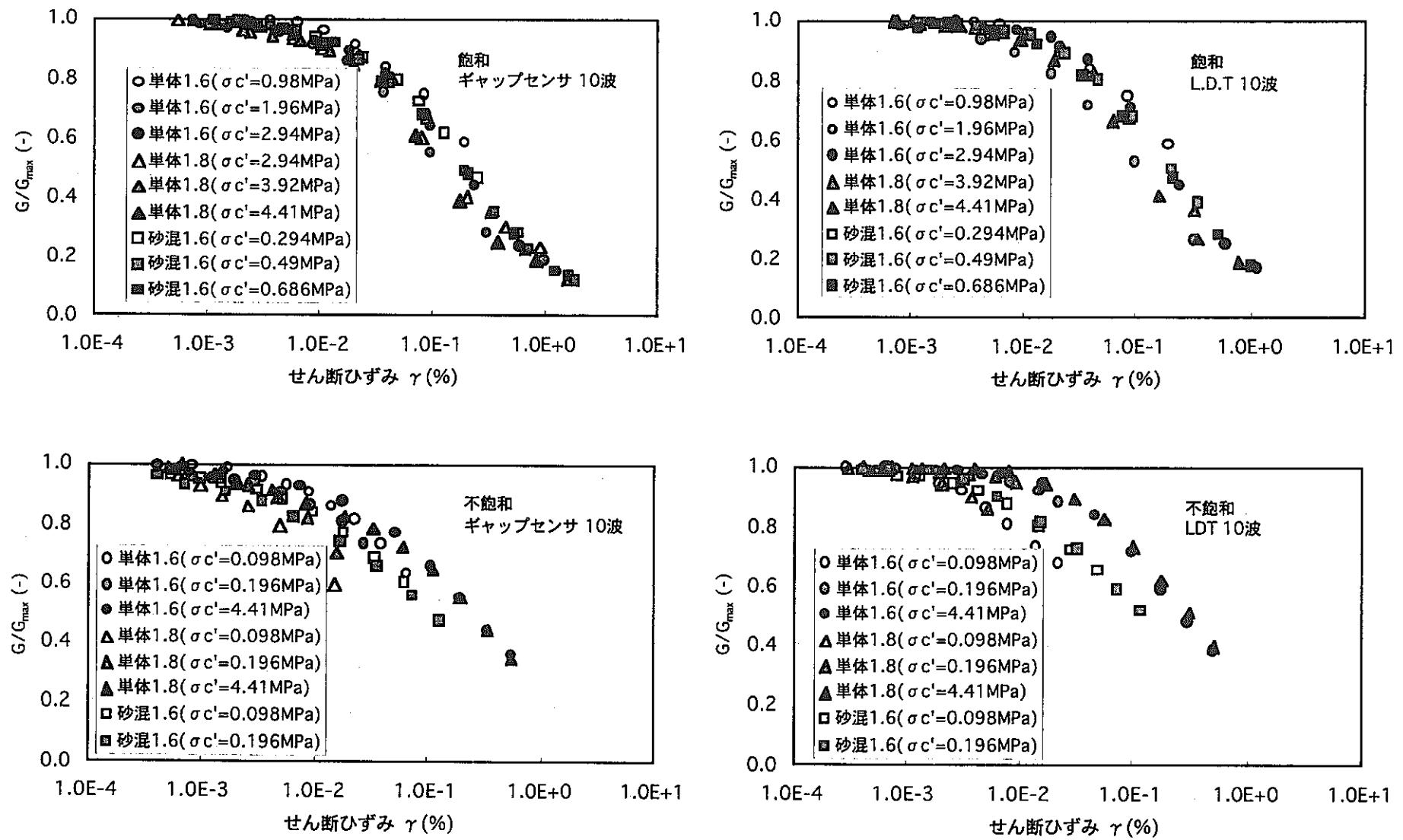


図 2-7 最大せん断剛性率と有効拘束圧の関係

図 2-8 せん断ひずみとせん断剛性比(G/G_{\max})の関係

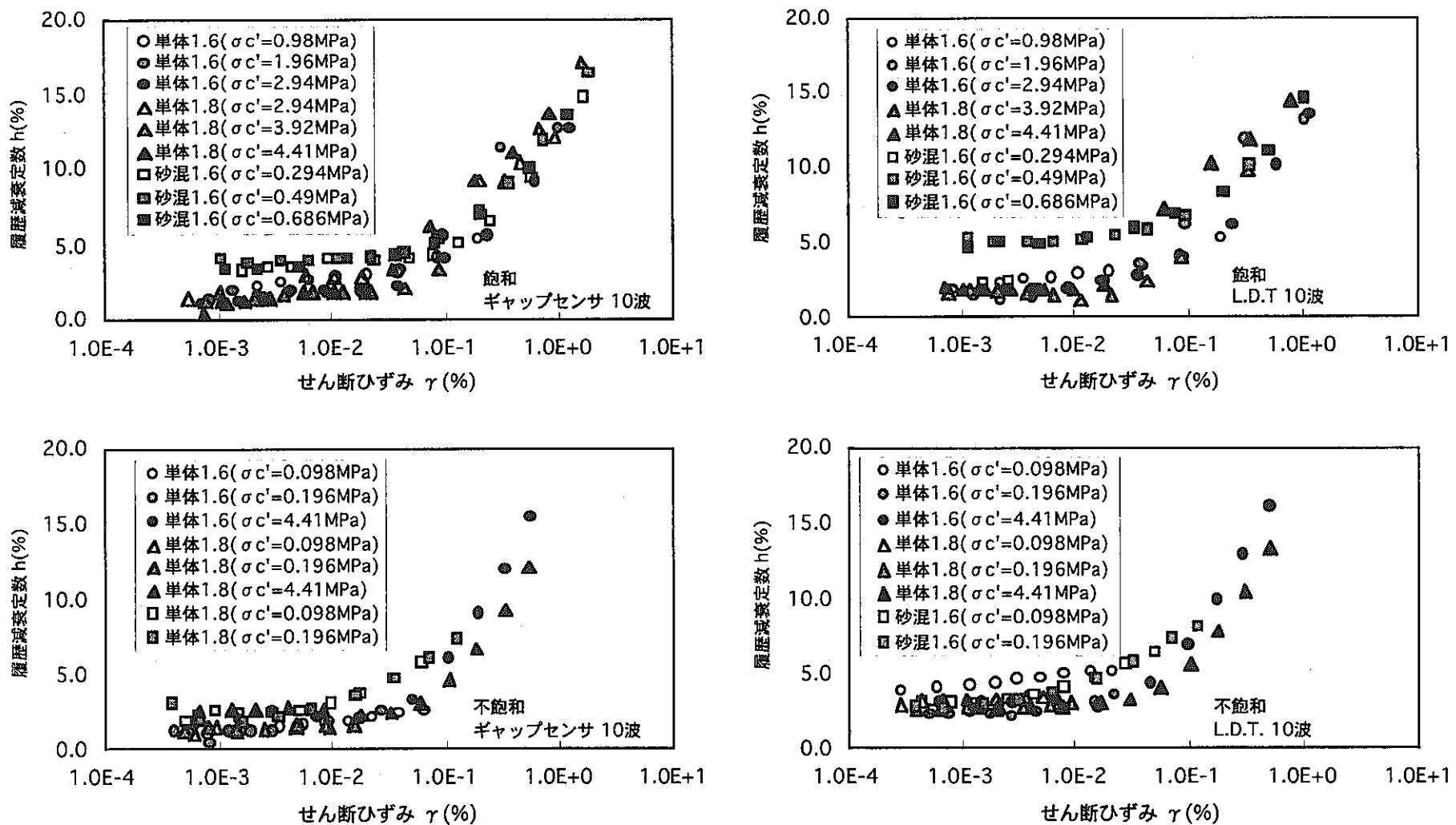


図 2-9 セン断ひずみと履歴減衰定数の関係

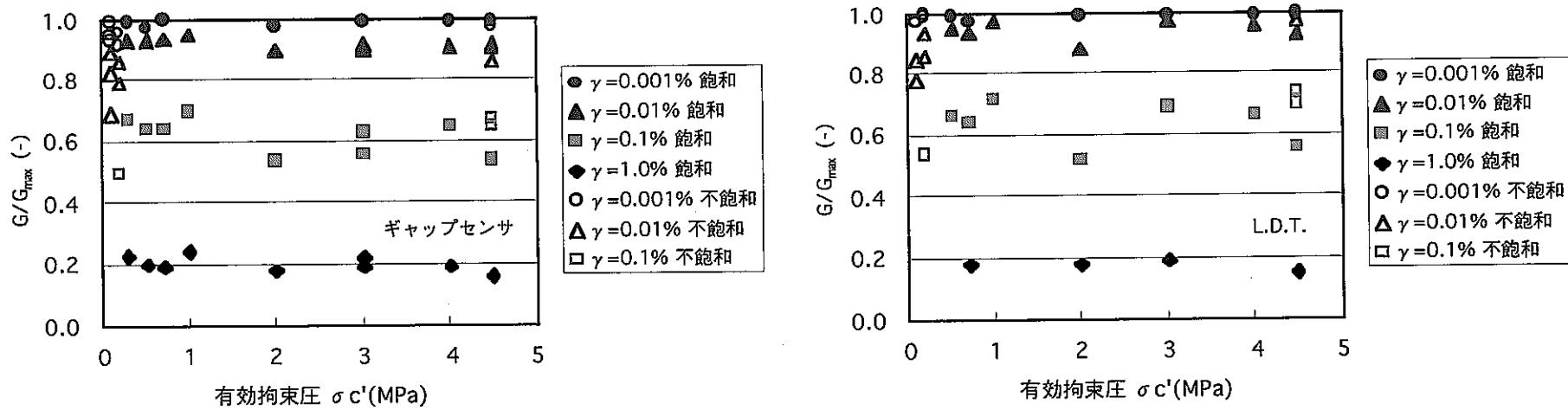
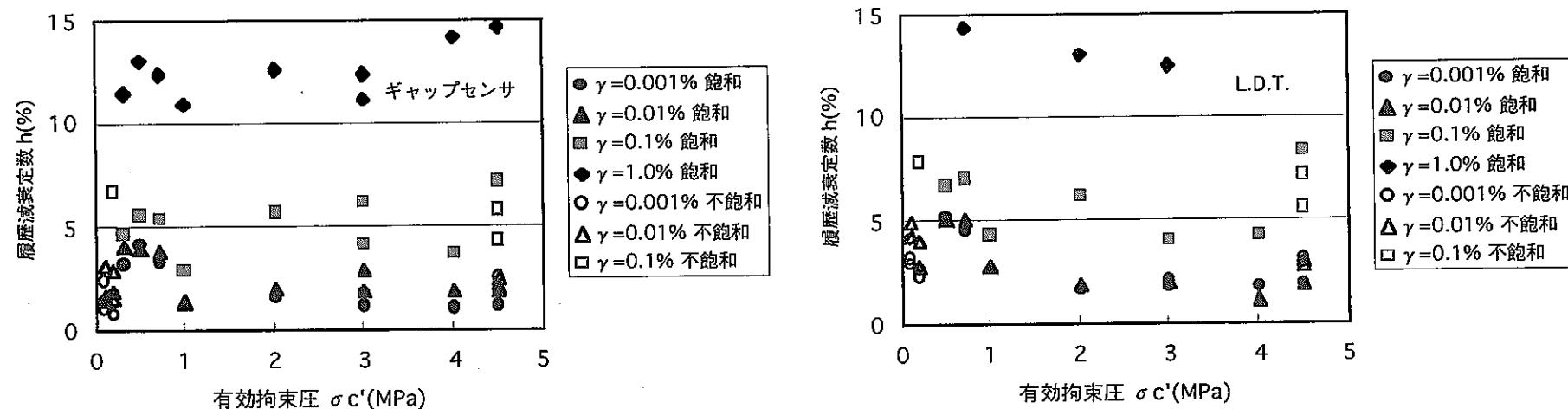
図 2-10 各ひずみレベルごとの有効拘束圧と剛性比 G/G_{\max} の関係

図 2-11 各ひずみレベルごとの有効拘束圧と履歴減衰定数の関係

2.2.6 動的変形特性のモデル化

土質材料の非線形ヒステリシス挙動を地震応答解析に適用するためには、数式モデル化する必要がある。試験結果から得られる等価せん断剛性率、履歴減衰定数を用いて応力～ひずみ関係の非線形ヒステリシス挙動を与える力学モデルのうち代表的なものに、応力～ひずみ関係の曲線を履歴曲線と骨格曲線（ひずみ振幅を変化させて得られる履歴曲線の頂点の軌跡）に分離し（図 2-12），骨格曲線を指數関数で表す Ramberg-Osgood モデル（R-O モデル）や双曲線関数で表す Hardin-Drnevich モデル（H-D モデル）がある⁸⁾。今回の試験結果を用いて両モデルによる検討を行ったが、結果的には後述する R-O モデルの 2 つのパラメータを柔軟に設定することにより H-D モデルよりも適切に表現できるため、ここでは R-O モデルによる試験データのモデル化についてのみまとめる。

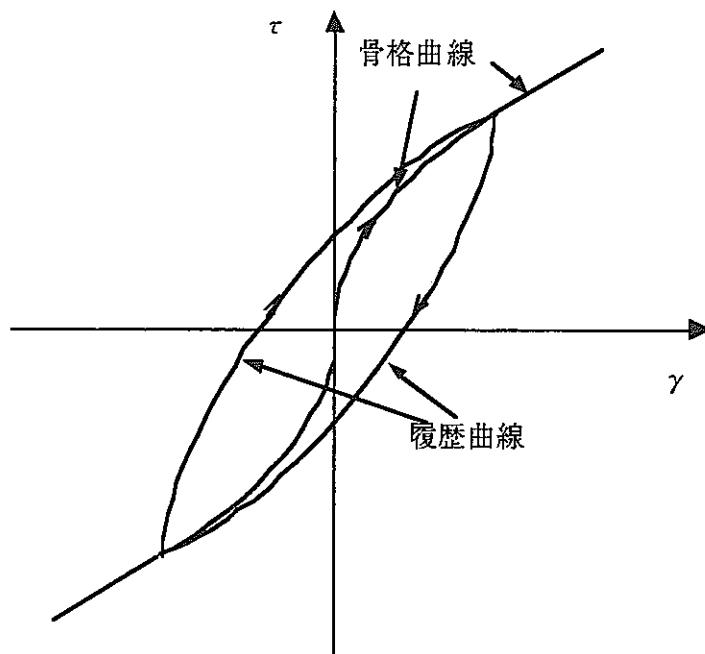


図 2-12 骨格曲線と履歴曲線の説明

R-O モデルによれば、骨格曲線は次式のように表せる。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} \left(1 + \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^{\beta-1} \right) \quad (2-4)$$

$$h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta-1}{\beta+1} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \quad (2-5)$$

ここで、 G_{\max} は $\gamma=0$ に相当する最大せん断剛性率、 τ はせん断強度 ($\tau=G\gamma$)、 τ_f は破壊せん断強度、 α 、 β はモデル固有のパラメータである。

G_{\max} , τ_f , α , β は次のように求めた。

- ① $\gamma=0$ (実際は $\gamma=10^{-4}\%$) に対応する G を近似曲線から求め, G_{\max} を設定する。
- ② G/G_{\max} と h の関係を二次曲線で近似し, $G/G_{\max}=0$ に相当する h により h_{\max} を設定する。しかしここでは前述のように、各ケースで h は拘束圧や間隙比に影響せずほぼ同一の挙動を示すことから、近似より求めた h_{\max} はほとんどのケースで 20% 前後となるため、全てのケースで $h_{\max}=20\%$ と統一した。
- ③ (2-5)式に $h=h_{\max}$, $G/G_{\max}=0$ を代入し, β を求める。今回は, $h_{\max}=20\%=\text{const.}$ と設定したため, $\beta=1.92=\text{const.}$ となる。
- ④ τ_f を別途実施した一軸圧縮試験結果から, $\tau_f = qu/2$ (qu : 一軸圧縮強度) により設定する。
- ⑤ $\gamma=10^{-4}\%$ に対応する $G_{\gamma=0.0001}$ をグラフから読み取り, $\tau_{\gamma=0.0001}=G_{\gamma=0.0001}\gamma$ から $\tau_{\gamma=0.0001}$ を求める。
- ⑥ (2-4)式に $\gamma=10^{-4}\%$, G_{\max} , τ_f , $\tau=\tau_{\gamma=0.0001}$, β を代入して α を求める。

求めた G_{\max} , h_{\max} , τ_f , α , β の一覧を表 2-3 に、また、これらのパラメータを用いて、(2-4) 式, (2-5) 式により、 γ と G/G_{\max} , h の関係を実験結果にフィッティングさせた結果を図 2-13 に示す。

図 2-13 より、全体的に R-O モデルは、試験結果をうまく表現しており、R-O モデルによる今回の設定方法によるフィッティングは妥当であると言える。

表 2-3 R-O モデルパラメータ一覧 (1/3)
 (a) ベントナイト単体 飽和 乾燥密度 1.6Mg m^{-3}

有効拘束圧(MPa)	0.98				1.96				2.94			
軸変位計測装置	L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ	
整理波数	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10
Gmax(MPa)	47.53	47.04	46.55	46.06	110.7	109.8	108.8	106.8	198.9	198	203.8	203.8
hmax(%)	20				20				20			
τ_f (MPa)	0.42				0.66				0.869			
α	2.712	2.034	4.26	3.525	7.192	6.703	6.031	5.176	1.282	1.113	2.975	2.975
β	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916

(b) ベントナイト単体 不飽和 乾燥密度 1.6Mg m^{-3}

有効拘束圧(MPa)	0.098				0.196				4.41			
軸変位計測装置	L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ	
整理波数	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10
Gmax(MPa)	338.1	339.1	122.5	121.5	380.2	382.2	364.6	374.4	700.7	705.6	715.4	700.7
hmax(%)	20				20				20			
τ_f (MPa)	0.512				0.479				0.517			
α	4.219	4.353	4.375	4.181	0.594	0.662	1.563	1.986	0.181	0.233	0.857	0.699
β	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916

表 2-3 R-O モデルパラメータ一覧 (2/3)
(c) ベントナイト単体 飽和 乾燥密度 1.8Mg m^{-3}

有効拘束圧(MPa)	2.94				3.92				4.41			
軸変位計測装置	L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ	
整理波数	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10
Gmax(MPa)			213.6	211.7	237.2	238.1	238.1	239.1	330.3	328.3	312.6	312.6
hmax(%)			20		20				20			
τ_f (MPa)	計測ミスによりデータとれず	1.424		1.491				1.585				
α		5.672	5.462	1.883	2.017	4.857	5.261	2.778	2.676	3.42	3.577	
β		1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	

(d) ベントナイト単体 不飽和 乾燥密度 1.8Mg m^{-3}

有効拘束圧(MPa)	0.098				0.196				4.41			
軸変位計測装置	L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ	
整理波数	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10
Gmax(MPa)	862.4	867.3	436.1	436.1	833	833	686	686	989.8	989.8	1068	1068
hmax(%)	20				20				20			
τ_f (MPa)	1.367				1.267				1.529			
α	4.443	4.501	14.91	14.91	0.683	0.706	4.649	4.702	0.292	0.315	2.157	2.126
β	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916

表 2-3 R-O モデルパラメーター一覧 (3/3)
(e)ケイ砂混合体 飽和 乾燥密度 1.6Mg m⁻³

有効拘束圧(MPa)	0.297				0.49				0.686			
軸変位計測装置	L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ	
整理波数	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10
Gmax(MPa)	29.89	29.89	29.4	29.4	39.2	39.2	42.14	42.63	62.72	63.21	60.76	61.74
hmax(%)	20				20				20			
τ_f (MPa)	0.127				0.165				0.178			
α	2.727	3.435	2.404	2.404	1.514	1.423	1.88	2.342	1.348	1.535	1.132	1.611
β	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916

(f)ケイ砂混合体 不飽和 乾燥密度 1.6Mg m⁻³

有効拘束圧(MPa)	0.098				0.196			
軸変位計測装置	L.D.T.		ギャップセンサ		L.D.T.		ギャップセンサ	
整理波数	5	10	5	10	5	10	5	10
Gmax(MPa)	99.47	100.5	87.22	88.2	134.3	134.3	139.2	139.2
hmax(%)	20				20			
τ_f (MPa)	0.131				0.14			
α	2.015	2.174	2.635	2.874	1.66	1.66	2.889	2.889
β	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916

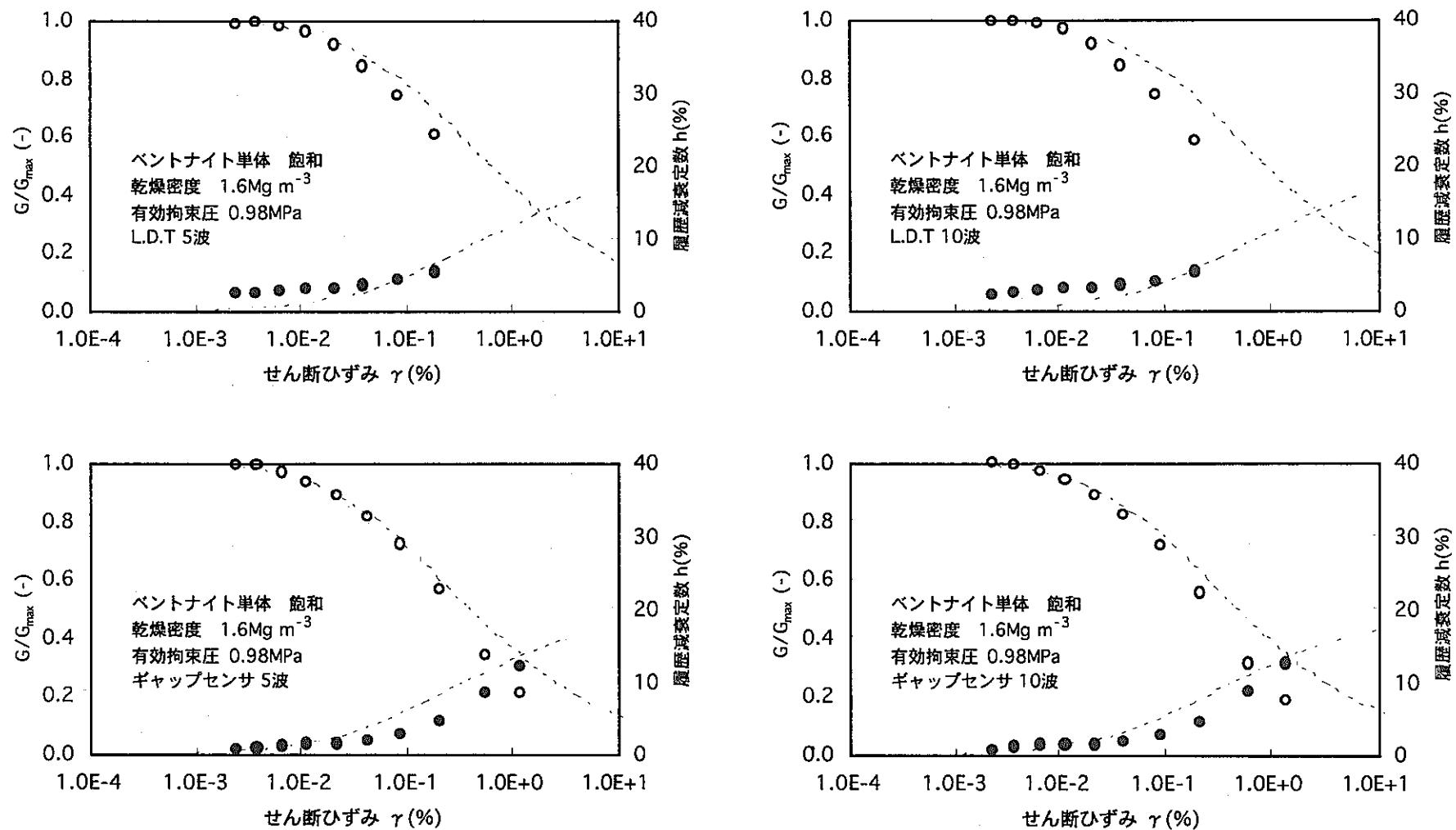
(a) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ 飽和状態 有効拘束圧 $\sigma' c' = 0.98 \text{ MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (1/17)

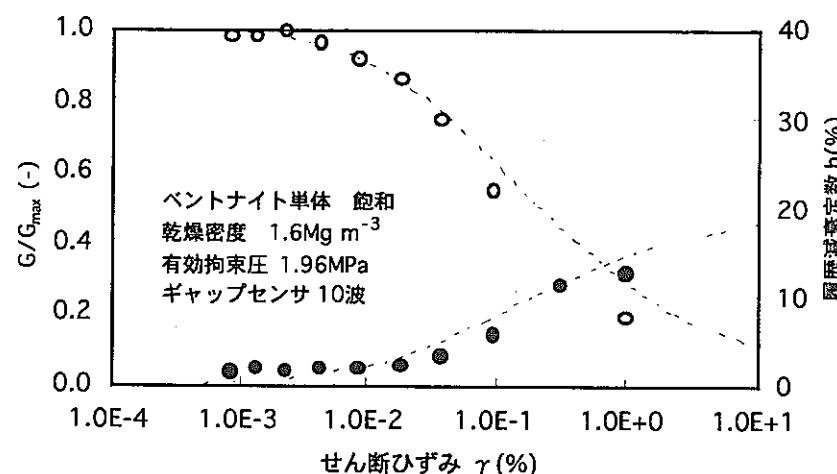
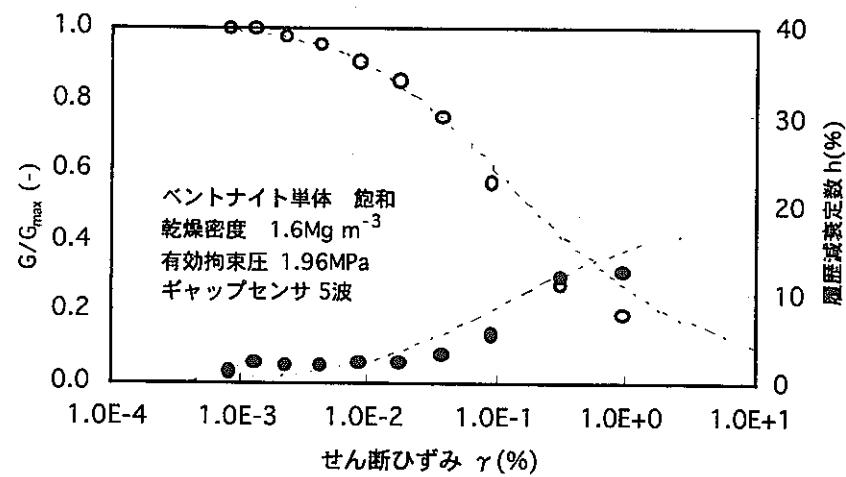
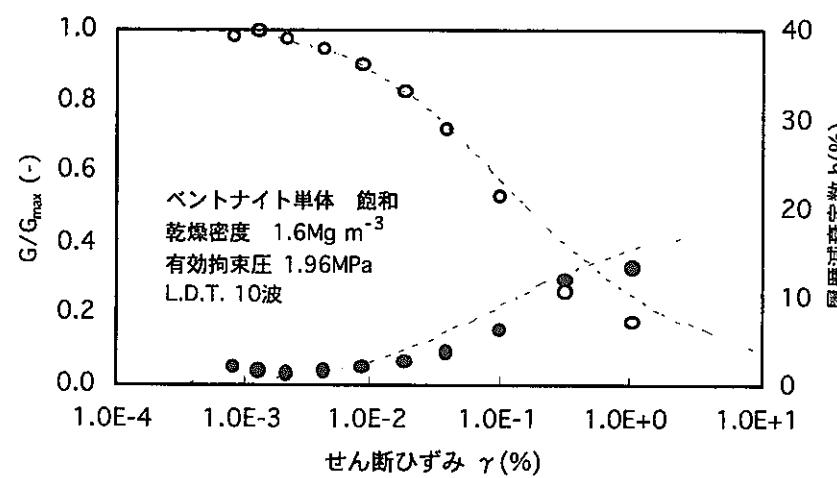
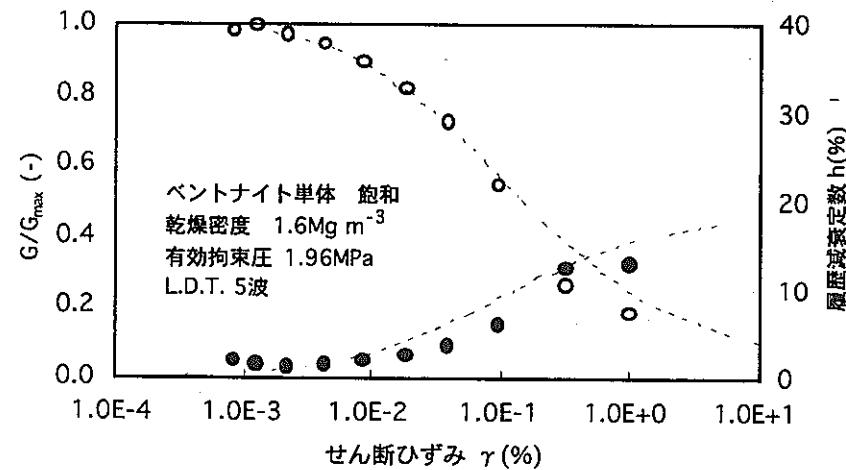
(b) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg m}^{-3}$ 饱和状態 有効拘束圧 $\sigma' c' = 1.96 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (2/17)

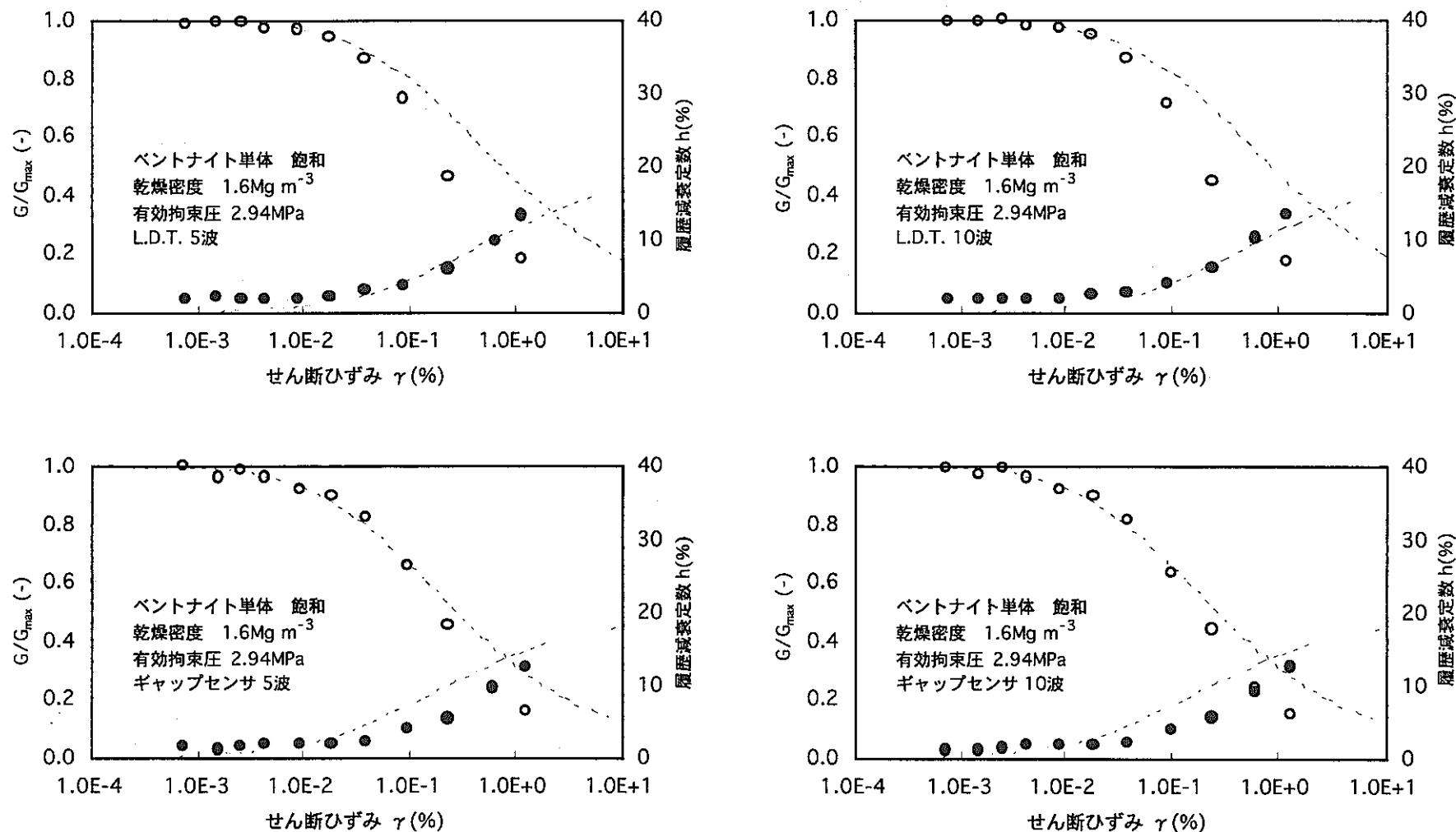
(c) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg m}^3$ 鮫和状態 有効拘束圧 $\sigma c' = 2.94 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (3/17)

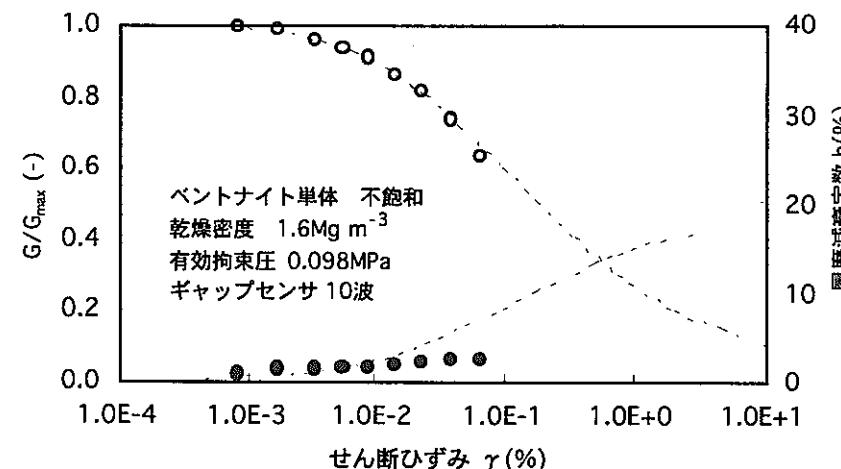
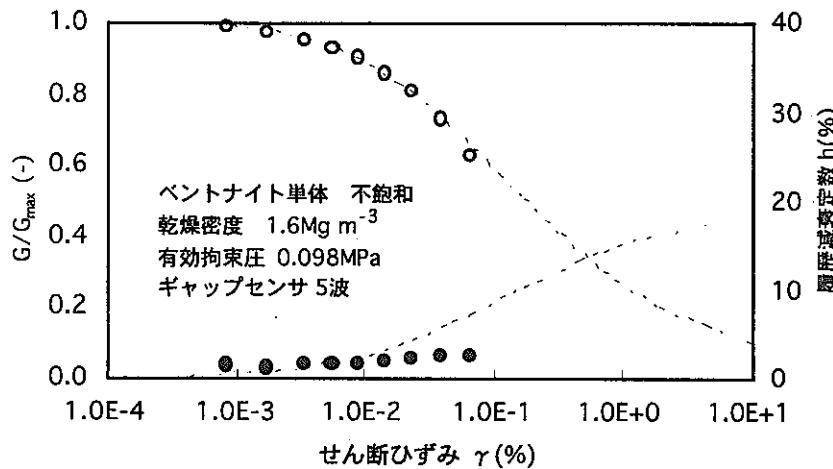
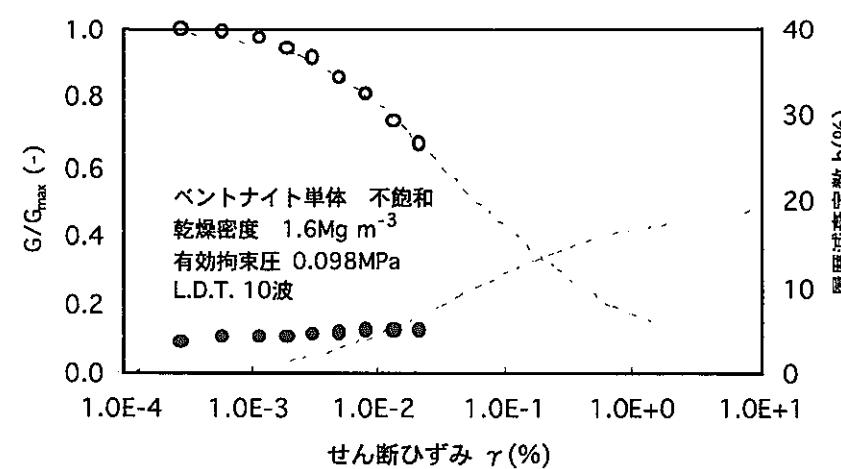
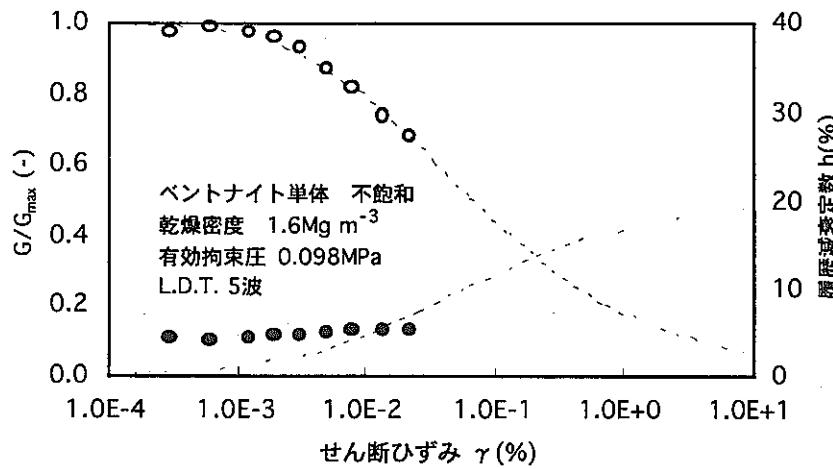
(d) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg m}^{-3}$ 不飽和状態 有効拘束圧 $\sigma_c' = 0.098 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (4/17)

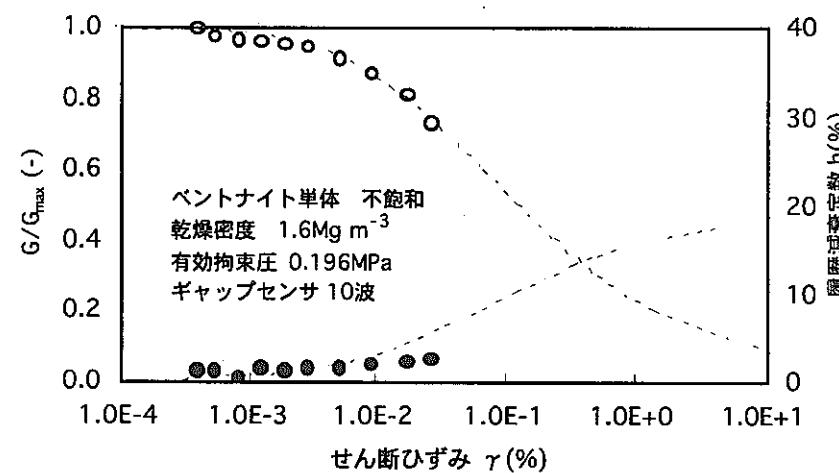
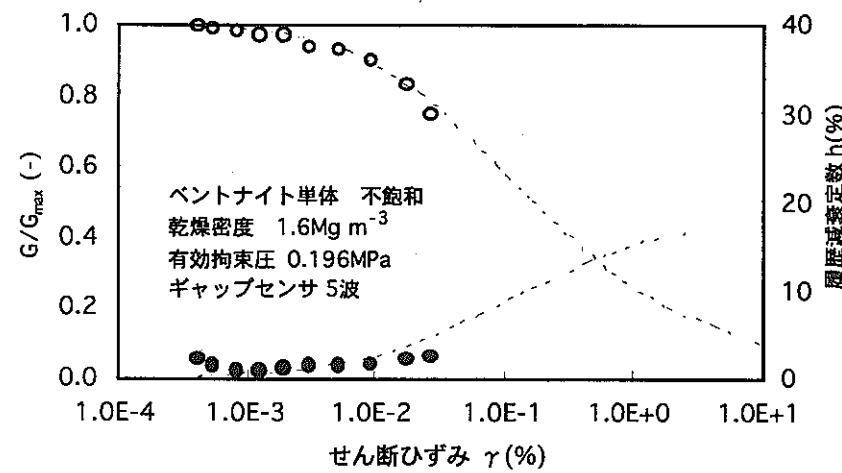
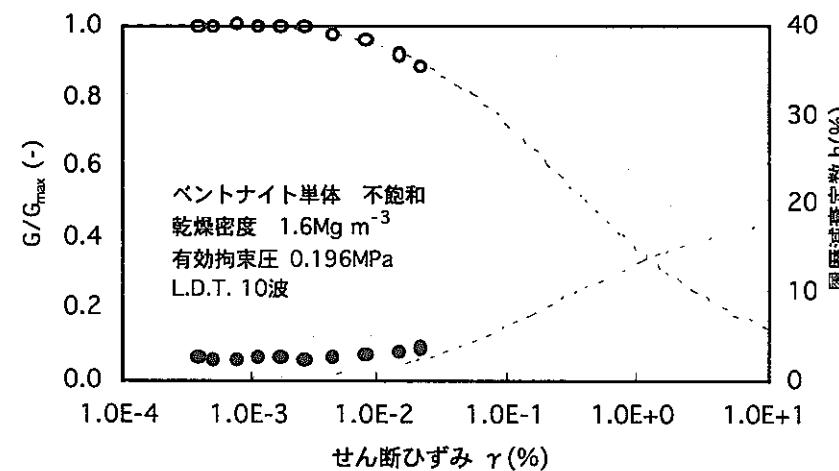
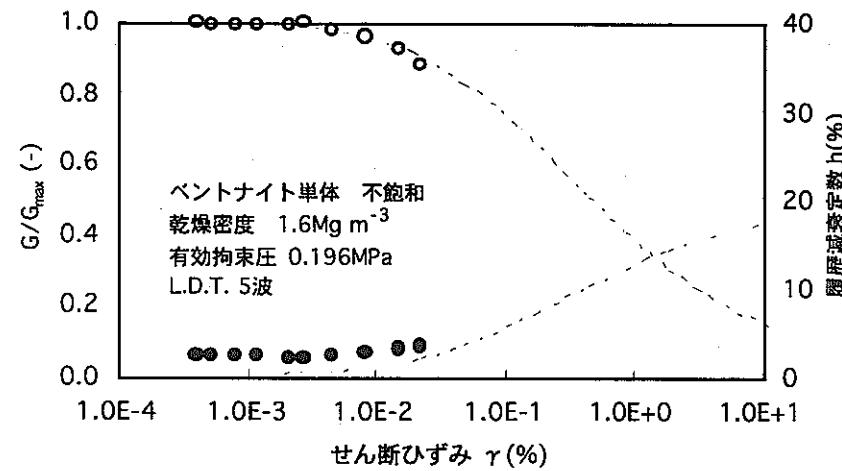
(e) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg m}^{-3}$ 不飽和状態 有効拘束圧 $\sigma_c' = 0.196 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (5/17)

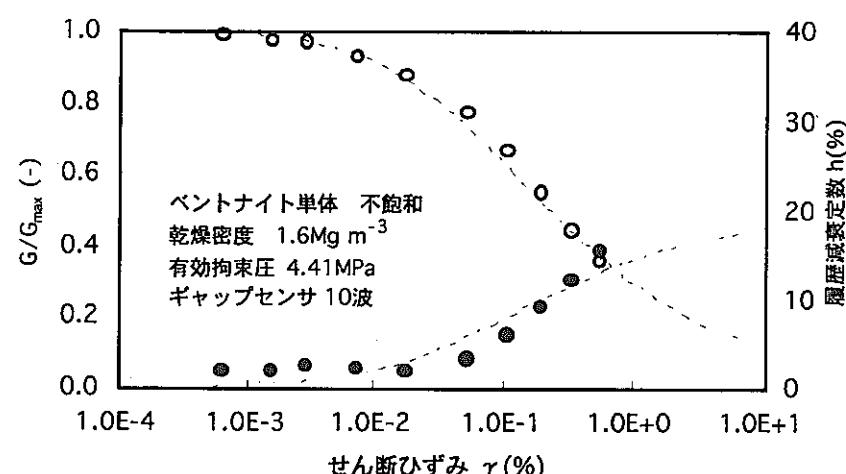
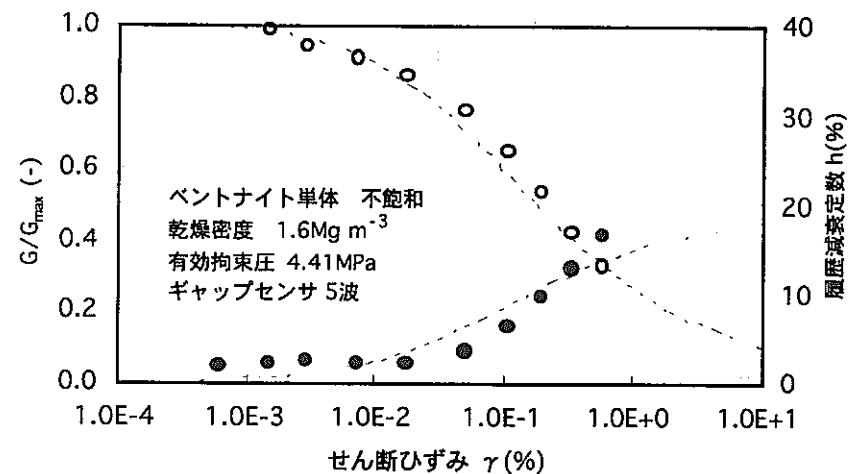
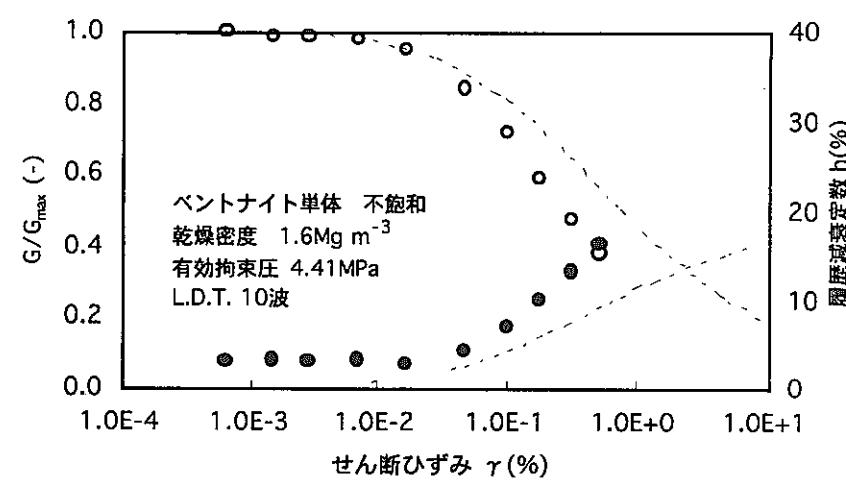
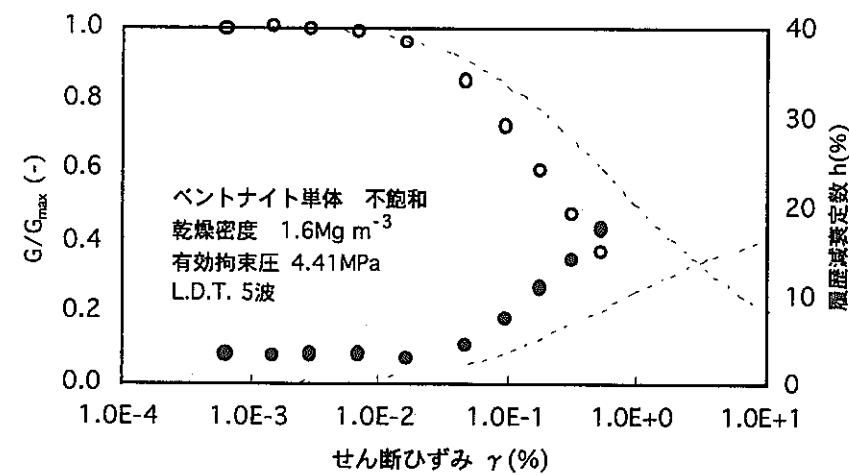
(f) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg m}^{-3}$ 不飽和状態 有効拘束圧 $\sigma_c' = 4.41 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (6/17)

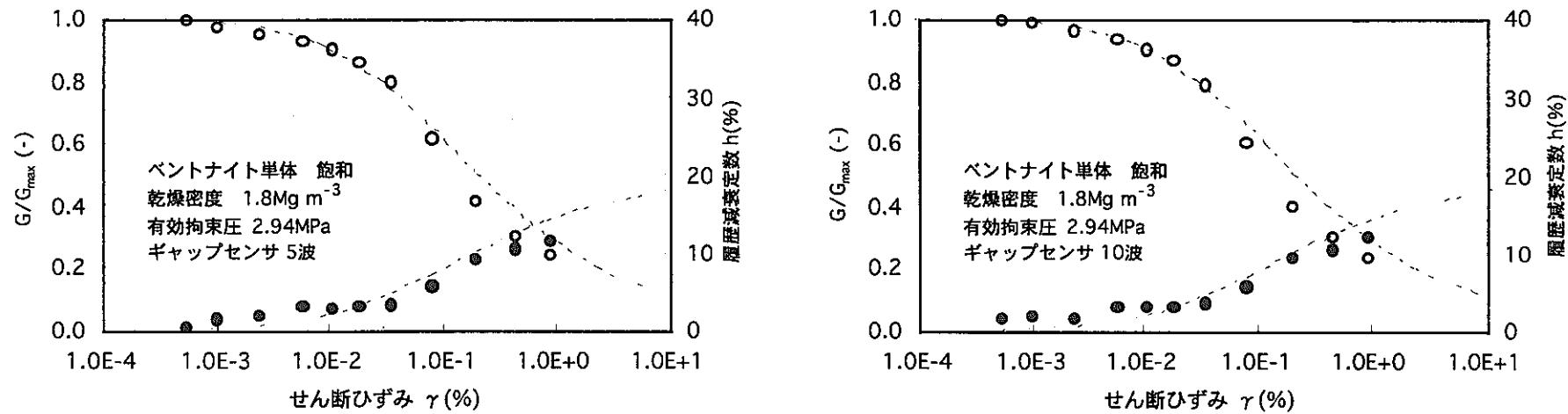


図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (7/17)

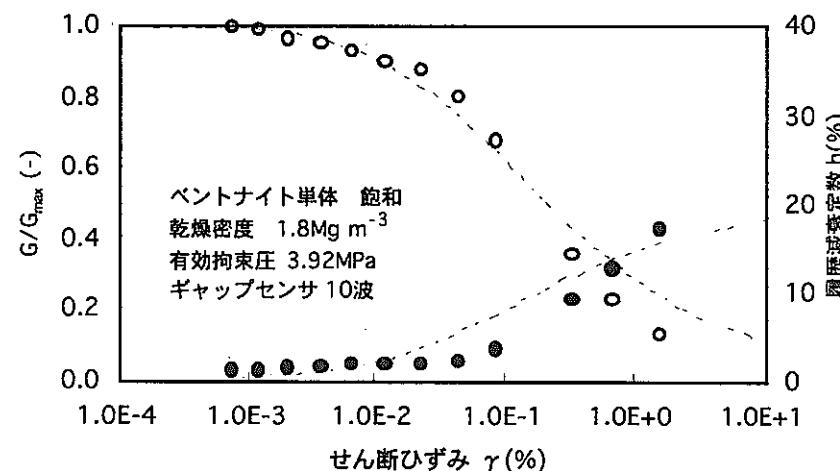
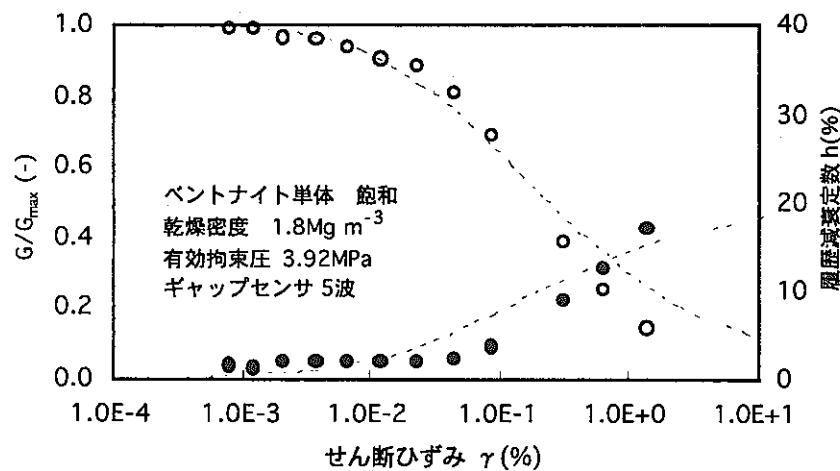
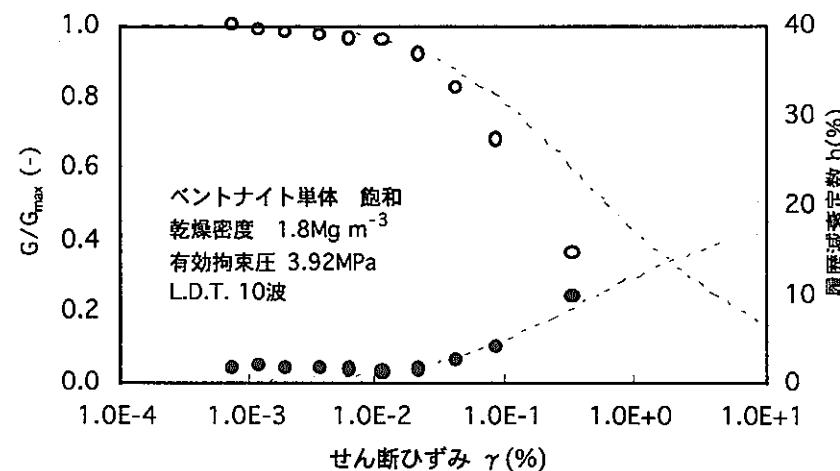
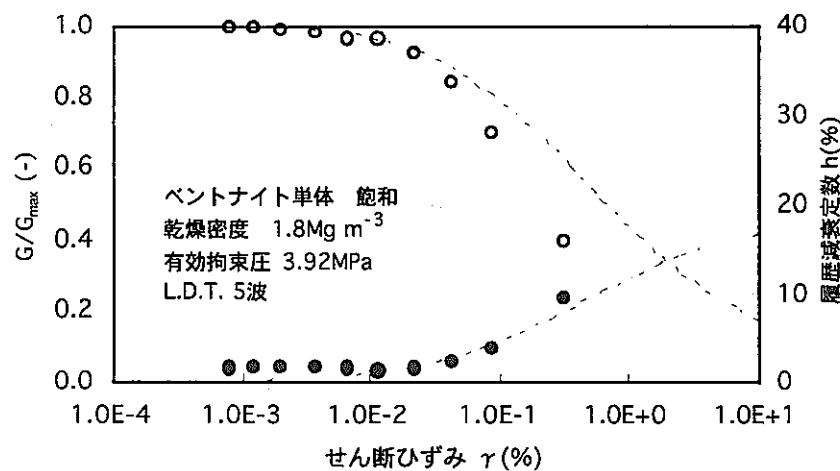
(h) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.8 \text{Mg m}^{-3}$ 饱和状態 有効拘束圧 $\sigma_c' = 3.92 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (8/17)

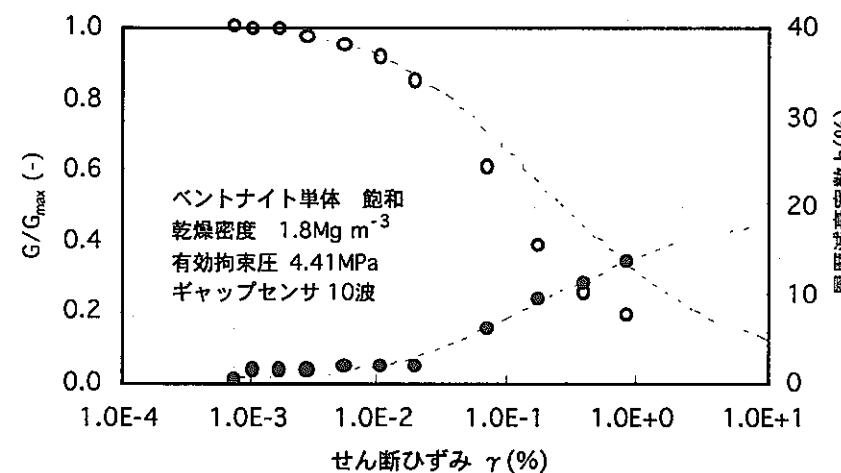
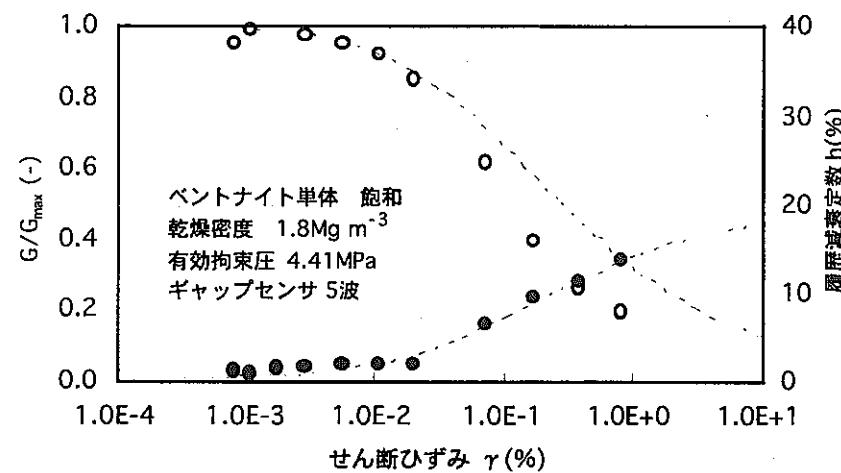
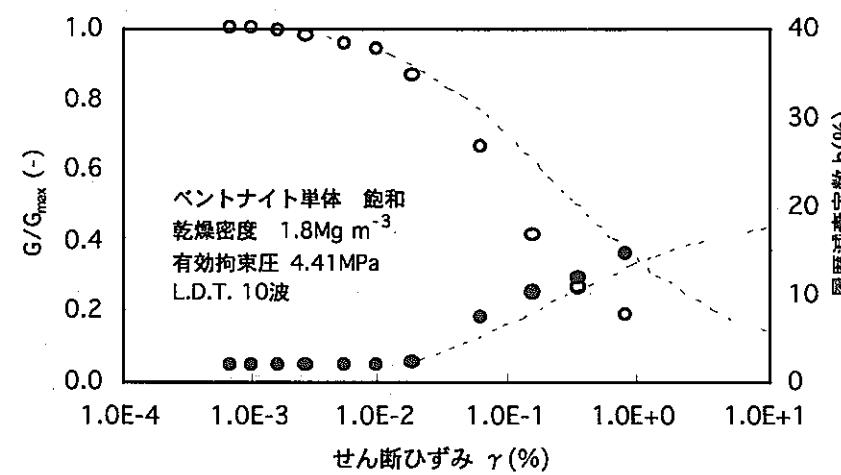
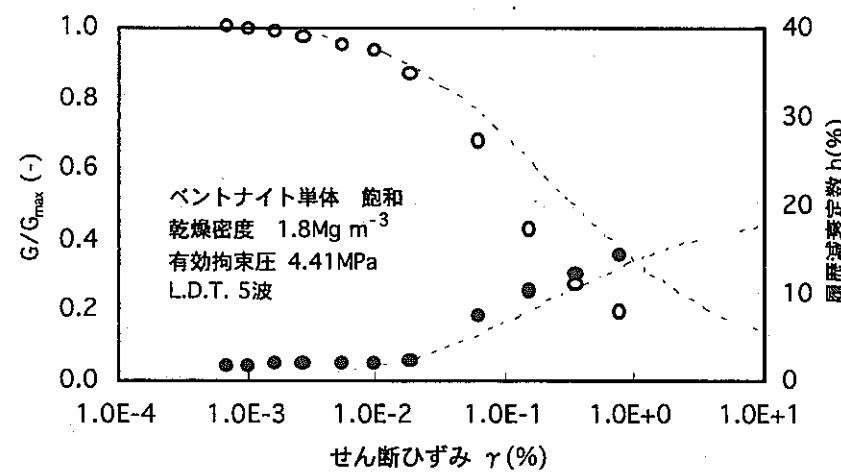
(i) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.8 \text{Mg m}^{-3}$ 鮫状態 有効拘束圧 $\sigma_c' = 4.41 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (9/17)

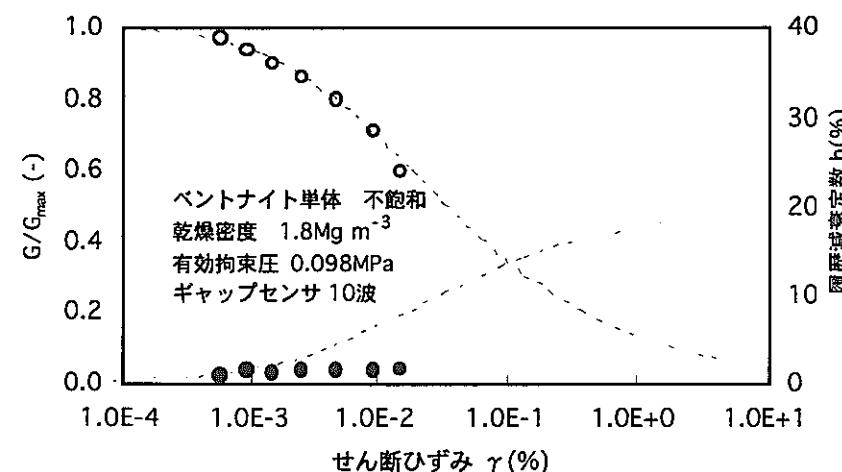
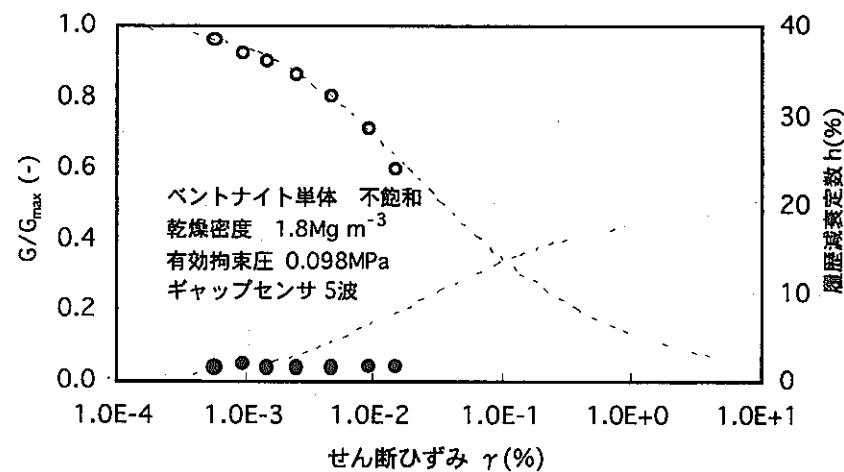
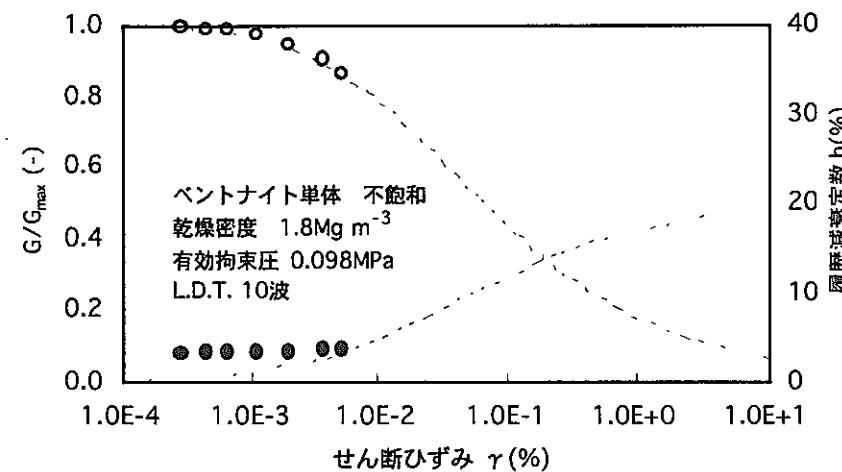
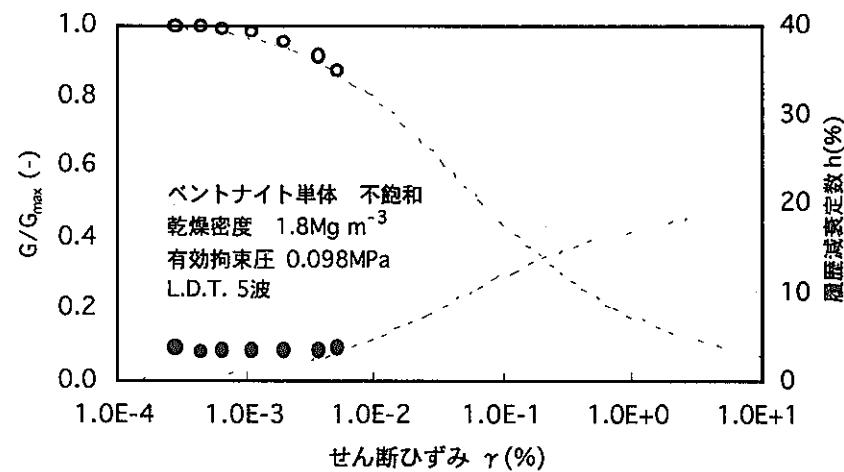
(j) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.8 \text{ Mg m}^{-3}$ 不飽和状態 有効拘束圧 $\sigma_c' = 0.098 \text{ MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (10/17)

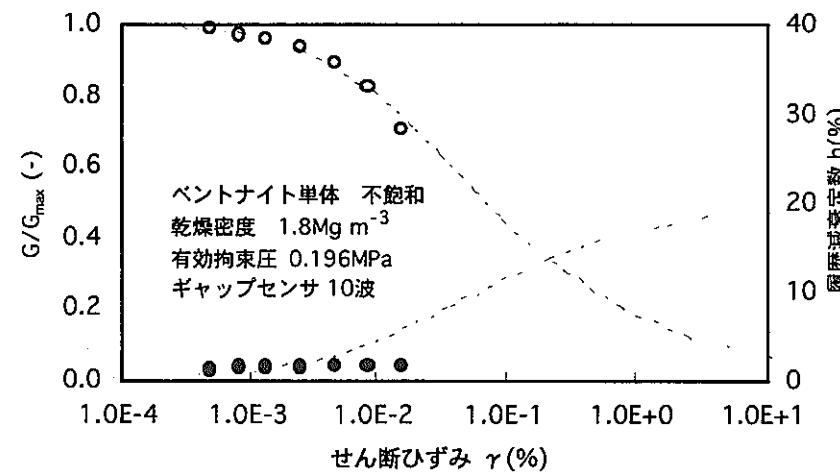
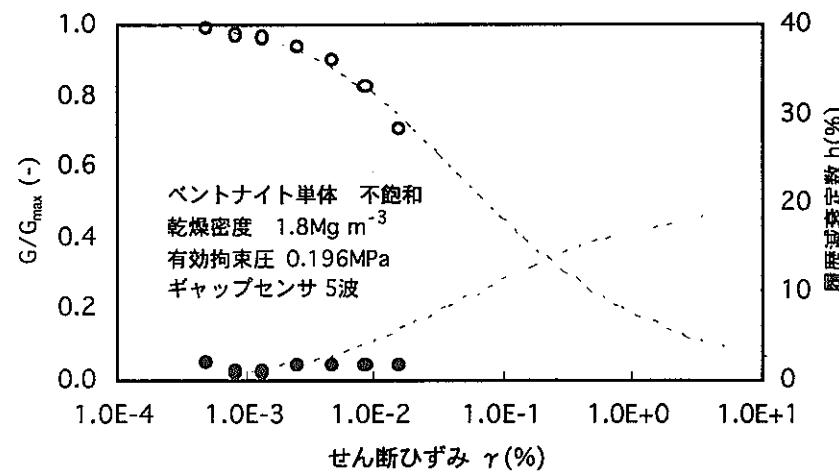
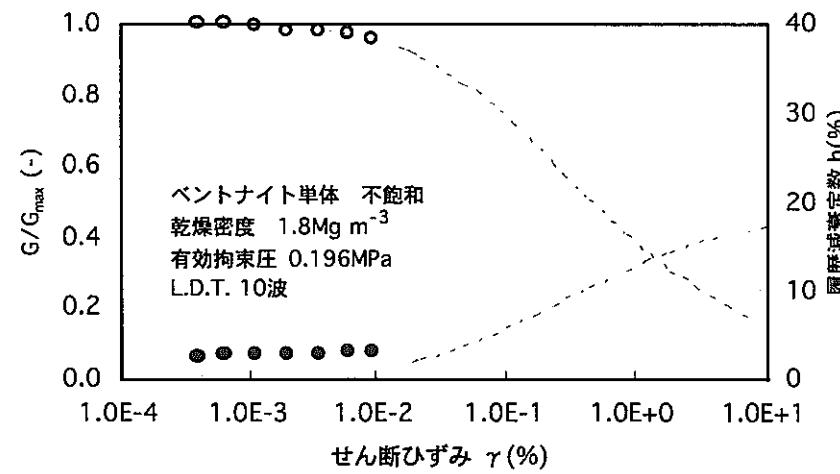
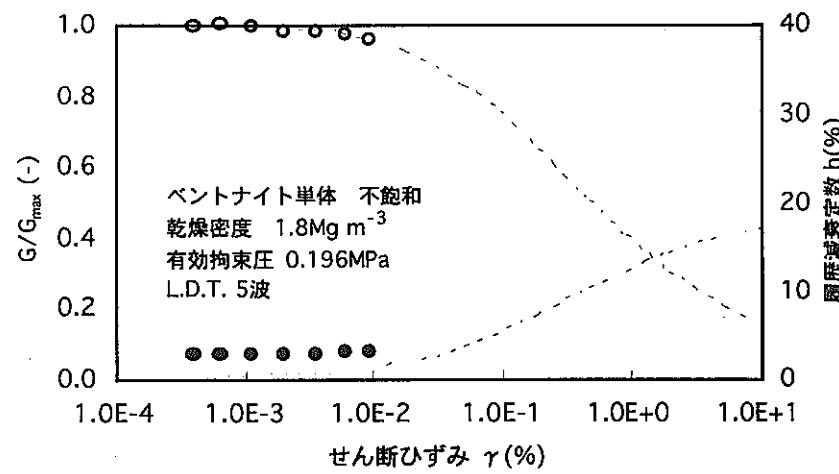
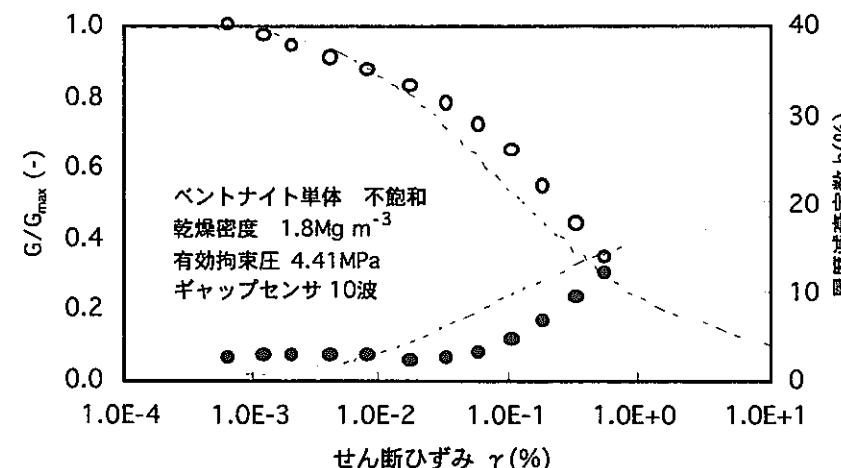
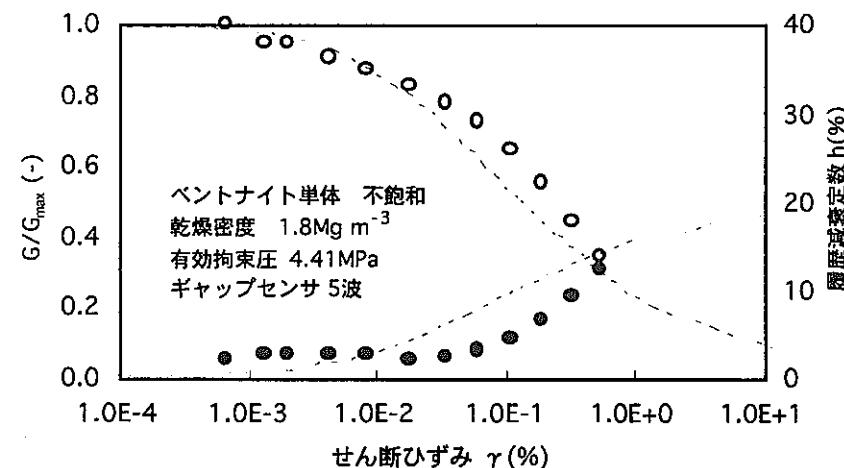
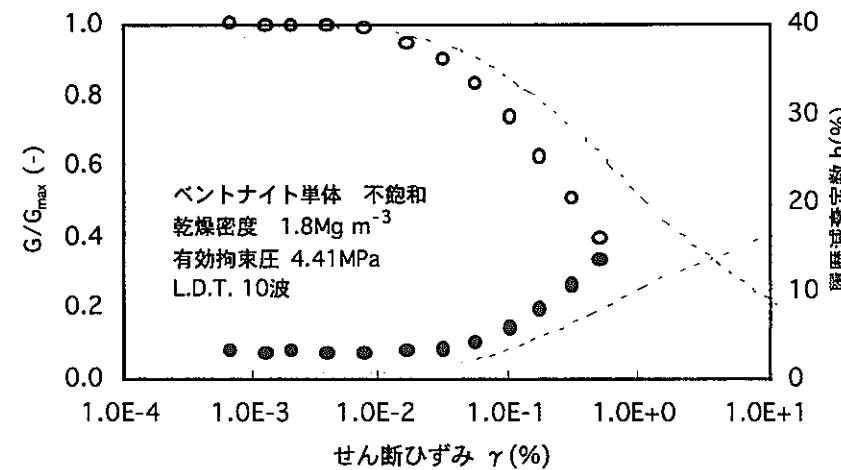
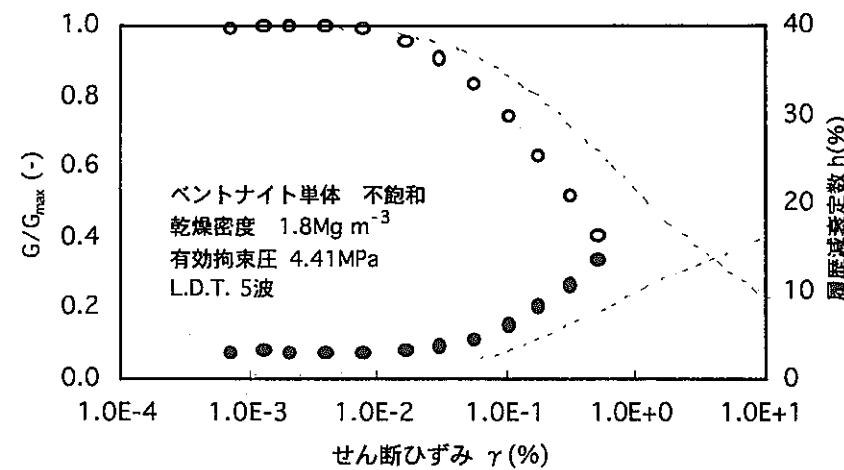
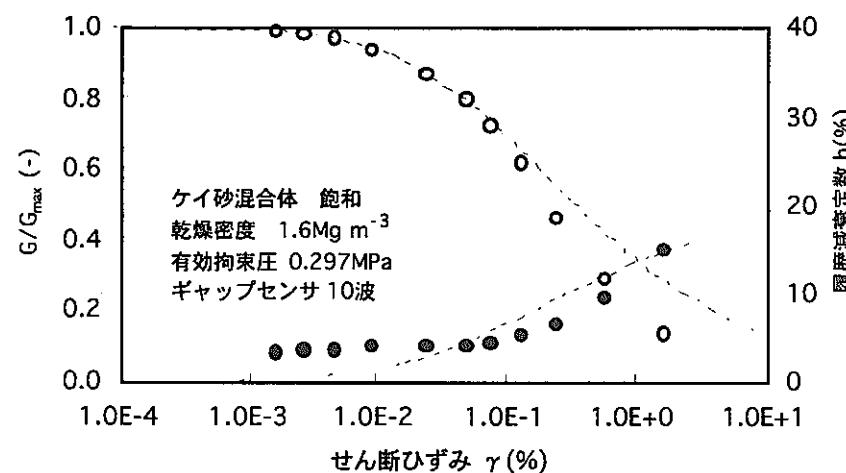
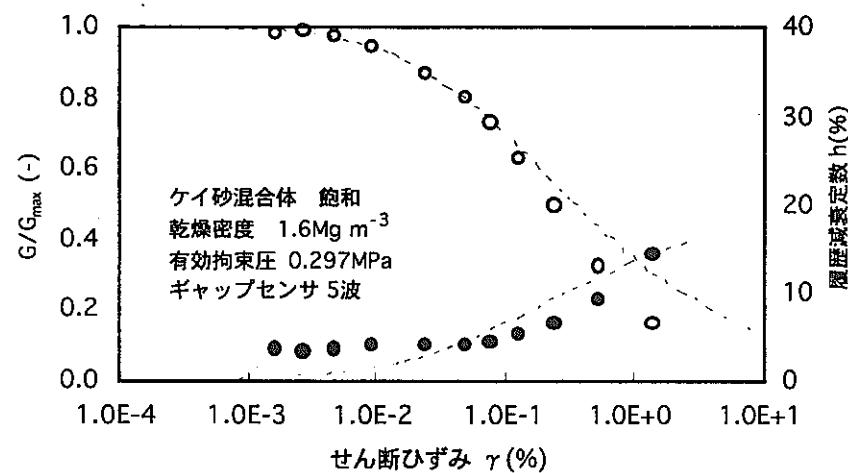
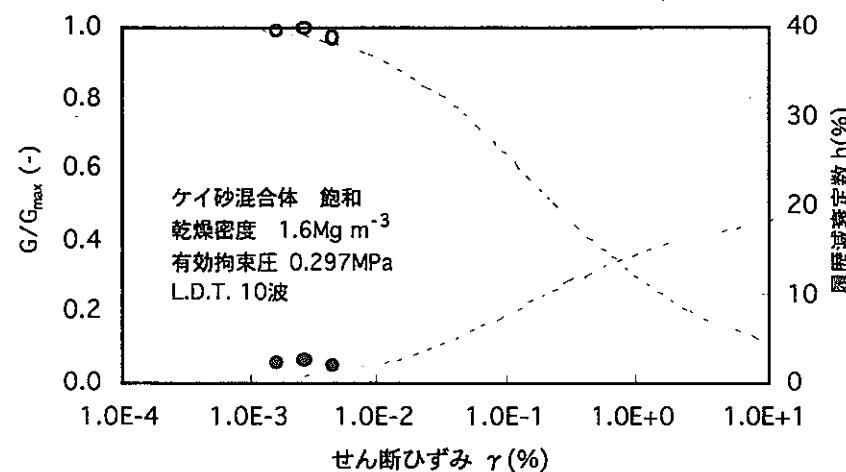
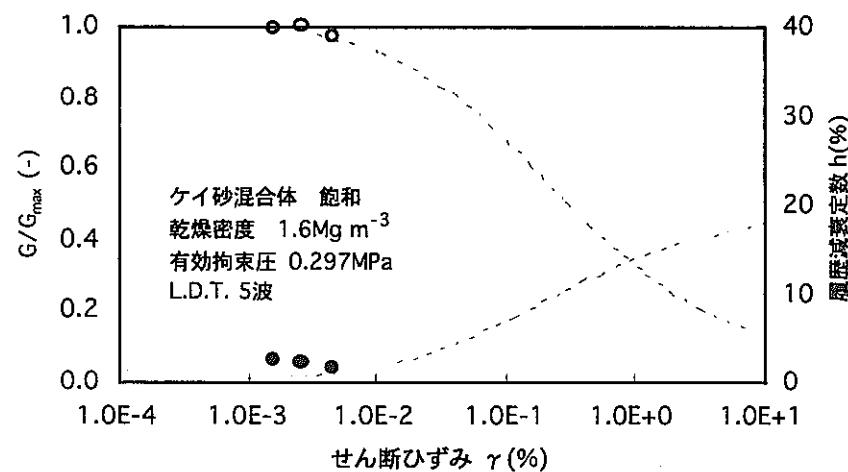
(k) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.8 \text{ Mg m}^{-3}$ 不飽和状態 有効拘束圧 $\sigma_c' = 0.196 \text{ MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (11/17)



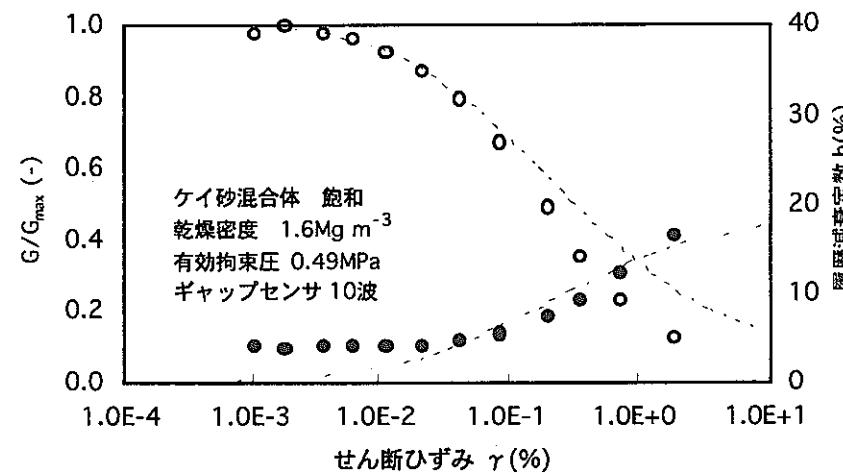
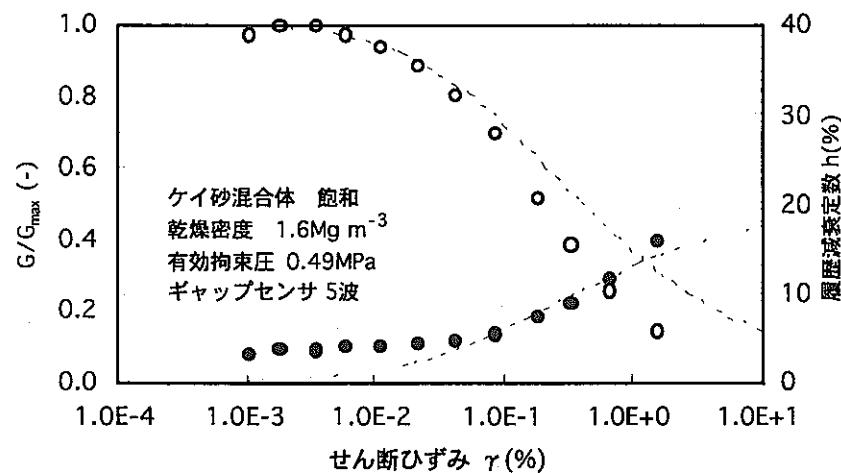
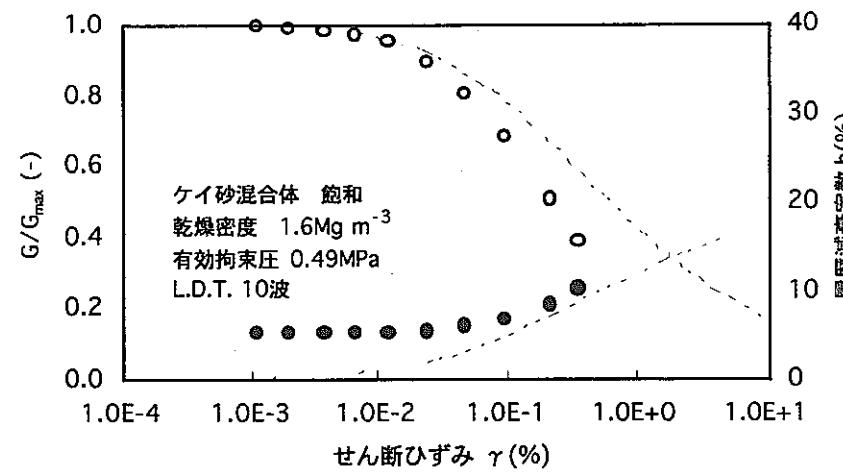
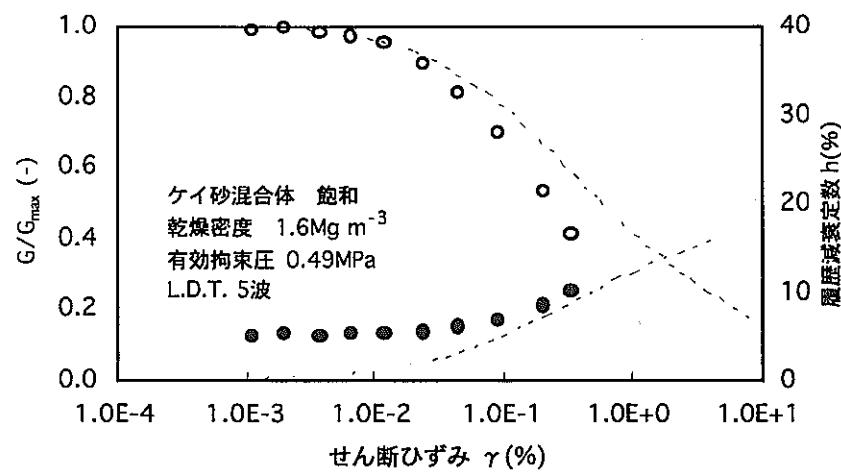
(I) ベントナイト単体 乾燥密度 $\rho_d = 1.8 \text{ Mg m}^{-3}$ 不飽和状態 有効拘束圧 $\sigma c' = 4.41 \text{ MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (12/17)



(m) ケイ砂混合体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg m}^{-3}$ 鮫状態 有効拘束圧 $\sigma' c' = 0.297 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (13/17)



(n) ケイ砂混合体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg m}^{-3}$ 鮫和状態 有効拘束圧 $\sigma' c' = 0.49 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (14/17)

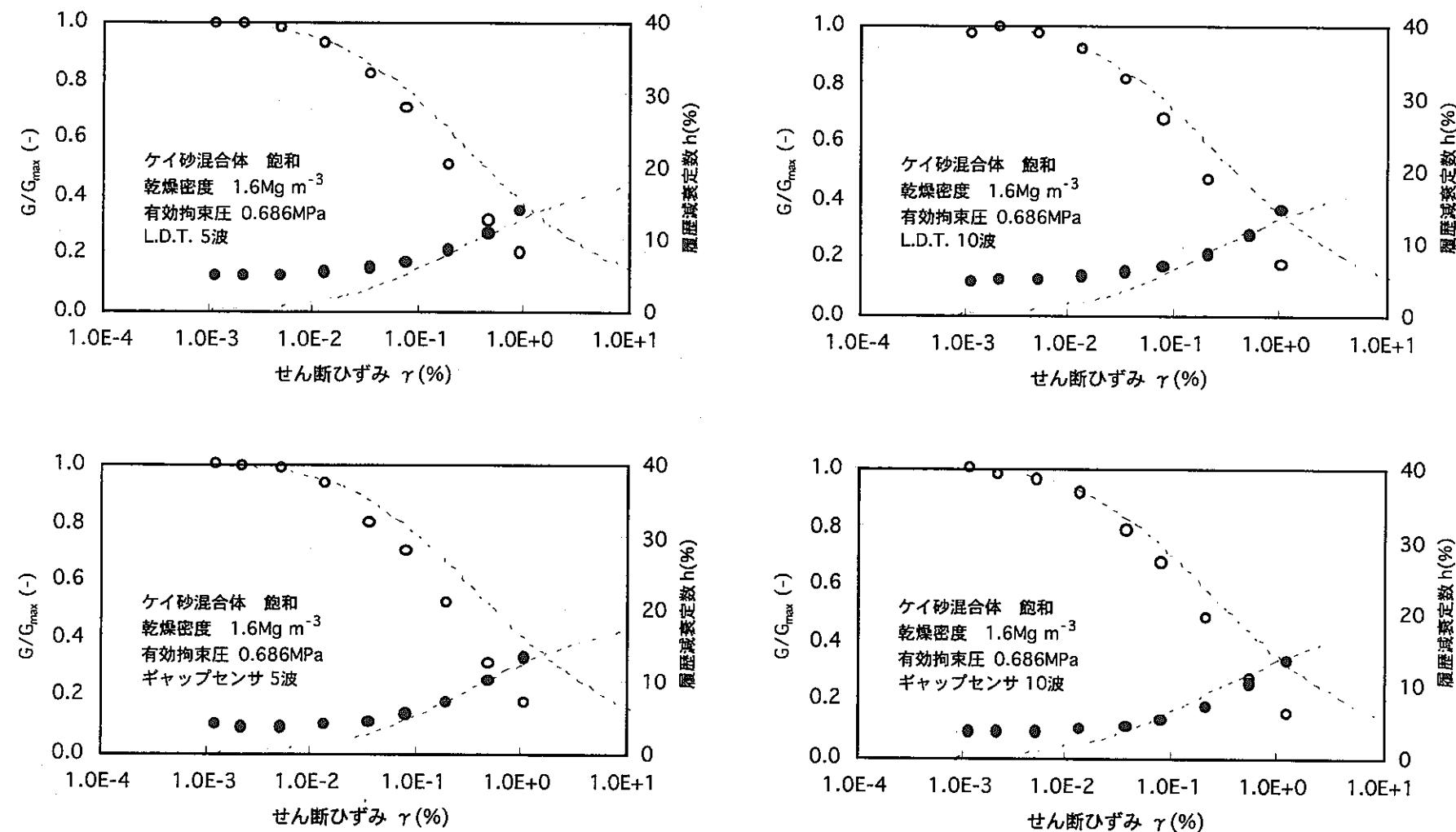
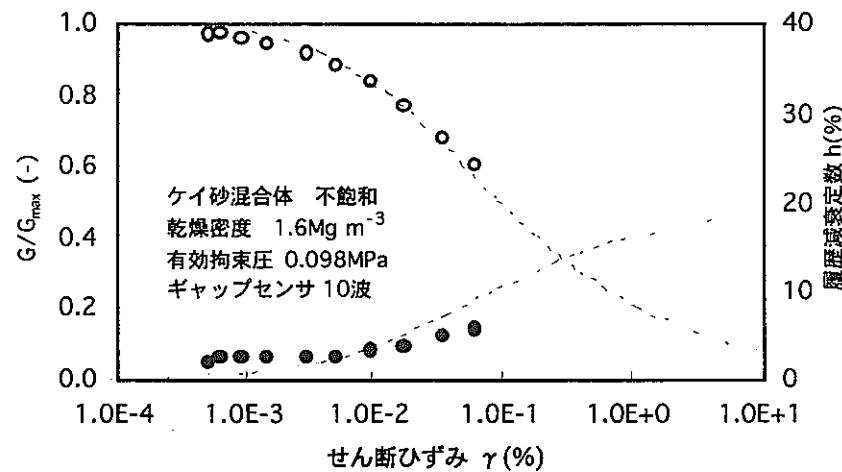
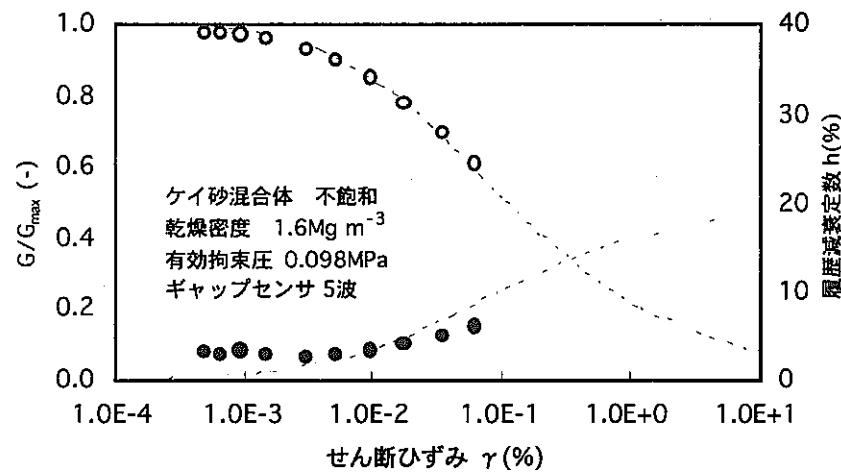
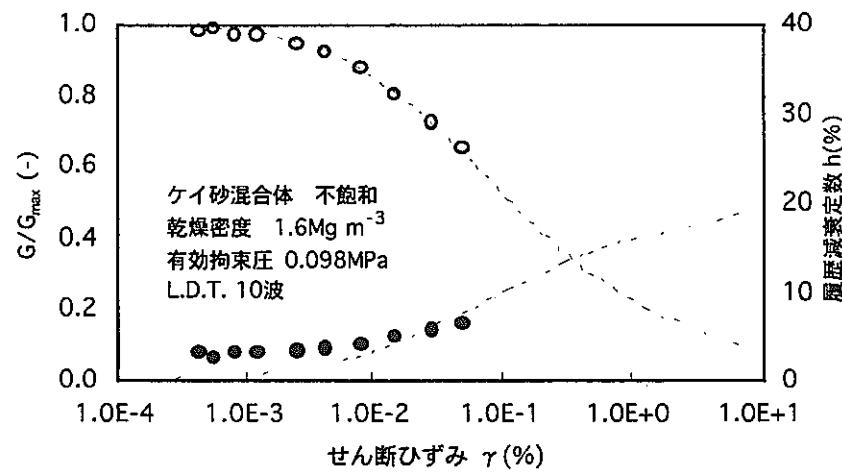
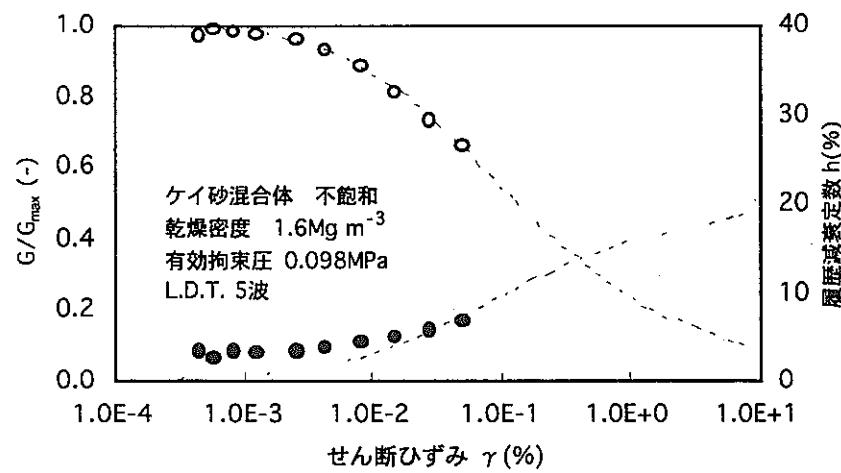
(o) ケイ砂混合体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ 鮫和状態 有効拘束圧 $\sigma' c' = 0.686 \text{ MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (15/17)



(p) ケイ砂混合体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg m}^{-3}$ 不飽和状態 有効拘束圧 $\sigma' c' = 0.098 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (16/17)

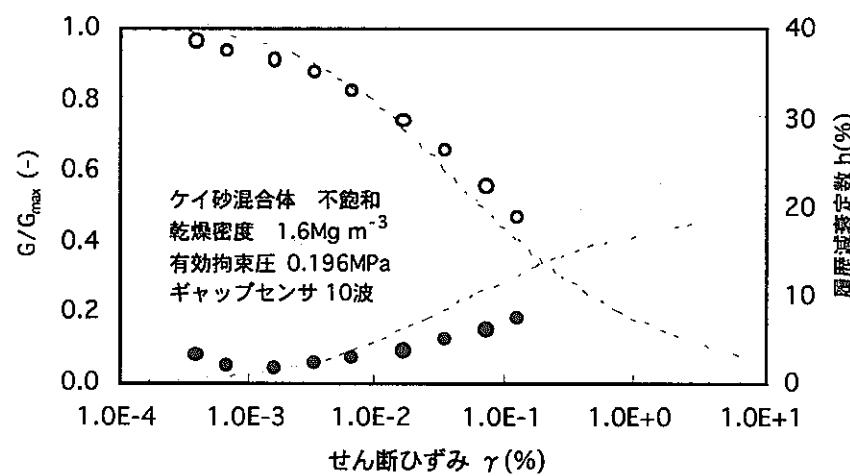
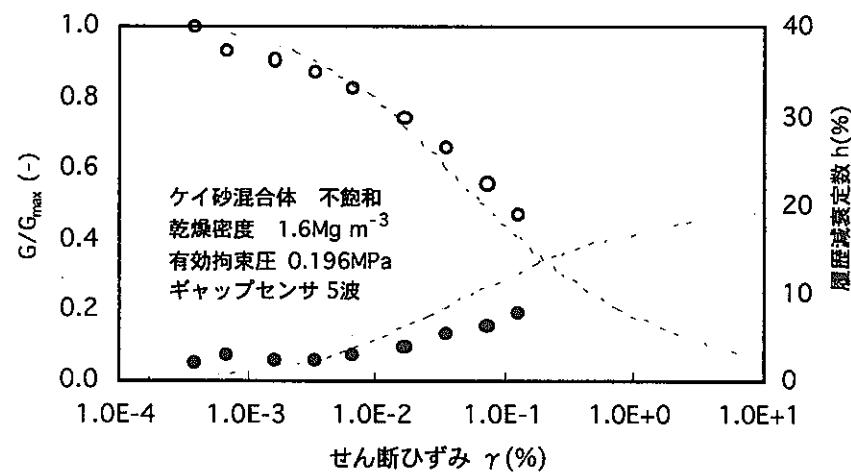
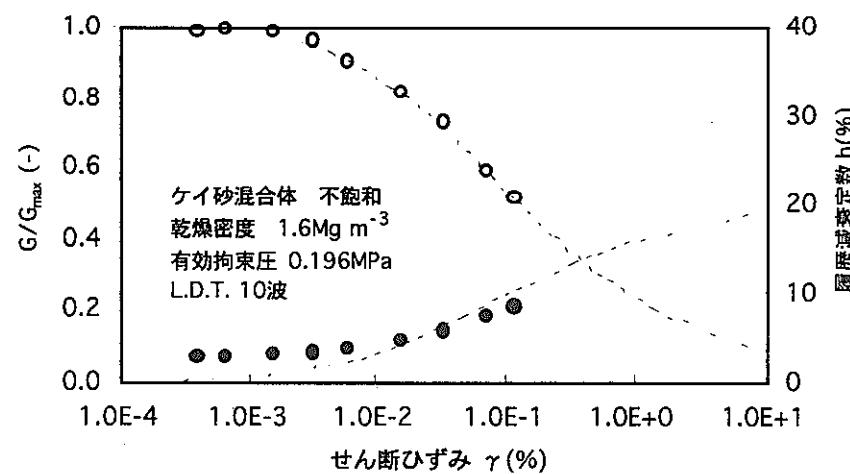
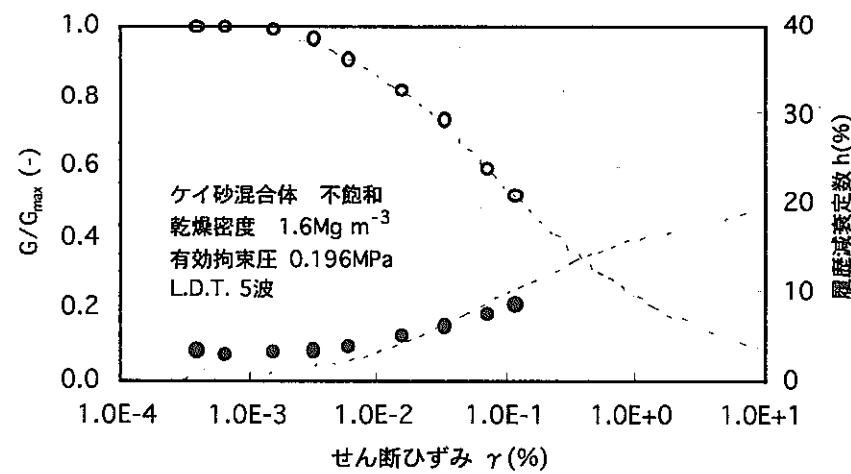
(q) ケイ砂混合体 乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg m}^{-3}$ 不飽和状態 有効拘束圧 $\sigma c' = 0.196 \text{MPa}$

図 2-13 R-O モデルによる試験結果のフィッティング (17/17)

2.2.7 その他の条件における試験結果

これまで述べてきた試験条件以外にも別の試験装置を用いて、乾燥密度の異なるベントナイト単体（飽和条件）で試験を行っている。詳細な条件等が不明確なため、別項にて参考データとしてせん断ひずみと等価せん断剛性率、履歴減衰定数の関係のみ以下に記載する。

(1) 試験条件、試験方法等

• 供試体仕様

材 料	: ベントナイト単体
寸 法	: 直径 $\phi = 50\text{mm}$, 高さ $h = 100\text{mm}$
初期乾燥密度	: 0.7 Mg m^{-3} , 1.0 Mg m^{-3} , 1.3 Mg m^{-3} (ベントナイト単体)
飽和条件	: 飽和

• 試験条件（圧密条件、載荷条件）

有効拘束圧	: 0.098 MPa , 0.196 MPa , 0.392 MPa (背圧 0)
載荷波形	: 正弦波
載荷周波数	: 0.5 Hz

軸力の載荷方法は本文と同様、軸差応力振幅を制御する応力制御により行い、軸差応力振幅は、1供試体に対してひずみの小さいほうから大きいほうへ10段階程度変化させるステージ方式により載荷した。また、1段階につき 0.5 Hz 程度の正弦波を10回加えた。データ処理に用いた波数は不明である。周ひずみは計測しておらず、軸ひずみは軸変位計のみである。

(2) 試験結果

動的三軸試験に先立って、各初期乾燥密度条件で非圧密非排水三軸試験を行った結果を表 2-4に示す。

表 2-4 三軸試験結果一覧

初期乾燥密度 (Mg m^{-3})	0.70	0.71	0.71	0.71	0.96	0.97	0.96	0.97	1.26	1.28	1.27	1.28	
有効拘束圧 (MPa)	0.02	0.20	0.39	0.69	0.02	0.20	0.39	0.69	0.02	0.20	0.39	0.69	
湿潤密度 (Mg m^{-3})	1.42	1.44	1.44	1.44	1.61	1.62	1.61	1.63	1.78	1.80	1.78	1.80	
含水比 (%)	104	104	104	104	68.1	68.1	68.1	68.1	40.8	40.8	40.8	40.8	
ピーク軸差応力 (MPa)	0.025	0.034	0.038	0.062	0.049	0.055	0.063	0.061	0.112	0.139	0.111	0.126	
粘着力 (MPa)					0.012				0.024				0.055
せん断抵抗角 (°)					1.4				0.5				0.6

せん断ひずみ γ と等価せん断剛性率 G , 履歴減衰定数 h の関係を図 2-14に示す。前述の結果同様, いずれのケースでも等価せん断剛性率や履歴減衰定数はひずみ依存性が認められ, 等価せん断剛性率, 履歴減衰定数それぞれの変化の度合いは, せん断ひずみ振幅が $10^{-2}\%$ を越えたあたりで急激になっている。

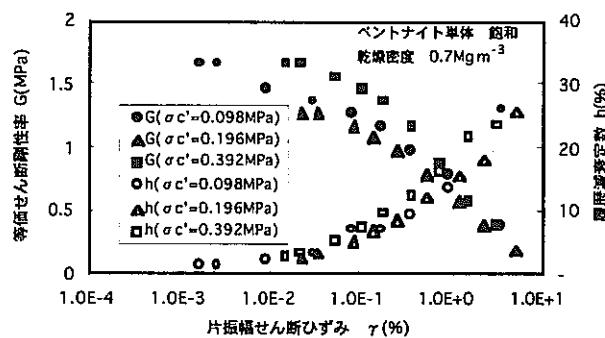
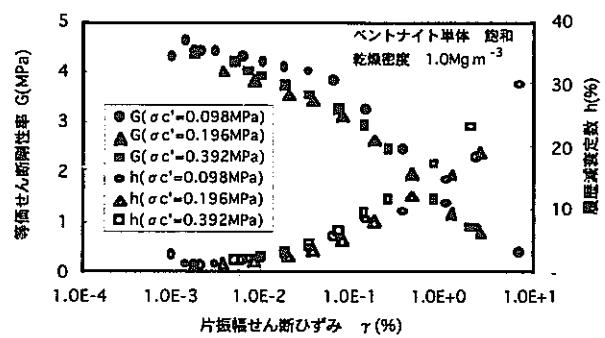
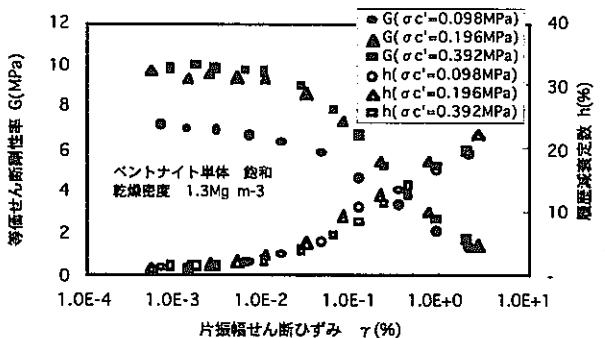
(a) ベントナイト単体 乾燥密度 0.7Mg m^{-3} 飽和状態(b) ベントナイト単体 乾燥密度 1.0Mg m^{-3} 飽和状態(c) ベントナイト単体 乾燥密度 1.3Mg m^{-3} 飽和状態

図 2-14 せん断ひずみと等価せん断剛性率, 履歴減衰定数の関係

3. 弹性波速度の測定

3.1 試験手法

3.1.1 試験概要

弾性波速度の測定には図 3-1に示すような、パルス発振部、増幅・制御部、発振・受信子および記録部からなる透過式超音波速度測定装置を用いた。この装置は、超音波パルスの繰り返し信号を発振子を介して供試体に与え、この超音波が受振子に到達する時間を測定するものである。振動子の周波数は約 100kHz である。

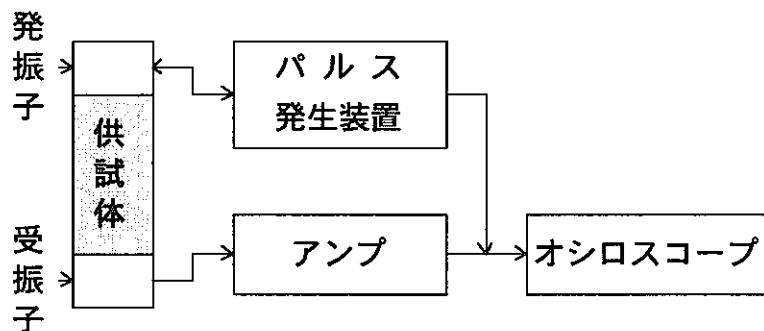


図 3-1 透過式超音波速度測定装置概念図

3.1.2 試験条件

供試体は、自然含水比状態の粉末ベントナイトおよび、ベントナイトとケイ砂の混合物を、所定の乾燥密度に必要な重量分を円筒形の圧縮固化体製作治具に投入し、一軸圧縮試験装置を用いて、上下二方向から静的に圧縮することにより作製した。測定対象は、ベントナイト単体およびケイ砂混合体の乾燥状態の供試体と飽和状態の供試体とし、乾燥密度、含水比をそれぞれ変え、表 3-1の条件で測定を実施した。なお以下では、供試体仕様毎の名称を便宜上、表に示す番号で表現する。

表 3-1 供試体設定仕様

	材料	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	含水比 ω (%)	供試体 No.
乾燥状態	ベントナイト単体	1.6	約 7	1
			約 10	2
		1.8	約 7	3
			約 10	4
	30wt%ケイ砂混合体	1.6	約 8	5
		1.8	約 8	6
	ベントナイト単体	1.6	約 25	7
		1.6	約 25	8

なお、ベントナイトはクニゲル V1、ケイ砂は粒径の異なる 3 号と 5 号の 2 種類を質量比で 1 対 1 で混合したもの用いた。ケイ砂混合体のケイ砂混合率は 30wt% である。供試体寸法は、直径 50mm、高さ 100 mm である。また、同一の仕様に対して、各 3 本について測

定した。

飽和状態の供試体は、乾燥状態で圧縮成型した後飽和セルに入れ、変形拘束状態で約2ヶ月、脱気・給水することにより作製した。

3.2 試験結果

微小ひずみレベルでのせん断剛性 G 、ポアソン比 ν は、地盤材料が等方弾性体であると仮定した場合、得られた V_p 、 V_s より次式で求められる。

$$G = \rho V_s^2 \quad (3-1)$$

$$\nu = \frac{2 - (V_p/V_s)^2}{2\{1 - (V_p/V_s)^2\}} \quad (3-2)$$

ここで、 ρ ：供試体密度

V_p ：疎密波 (P波)速度

V_s ：せん断波 (S波)速度

測定結果一覧を表 3-2に示す。また、含水比と弾性波速度の関係を図 3-2に、飽和度と弾性波速度の関係を図 3-3に示す。この結果から以下のことが言える。

3.2.1 弹性波速度

ベントナイト単体、ケイ砂混合体とも含水比が高くなると (No.1,2,7 間および N.5,8 間)、 V_p は増加し、 V_s は減少する。ただし、不飽和状態では、ケイ砂混合体と比べ、ベントナイト単体の方が (No.1,5 間および No.3,6 間) V_p 、 V_s とも約 1.3~1.5 倍大きいが、飽和状態 (No.7,8 間) ではその差がほぼなくなった。また、不飽和状態のみの比較ではあるが、乾燥密度が大きい方が (No.1,3 間、No.2,4 間および No.5,6) V_p 、 V_s とも約 1.3~1.5 倍大きくなつた。

3.2.2 ポアソン比

ポアソン比 ν は式(3-1)により、 V_p と V_s の比で求められる。No.1~No.6 の乾燥状態では、ポアソン比は 3 供試体の平均で 0.28~0.34 の範囲にあり、動的三軸試験結果より得られた動的ポアソン比 (微小ひずみレベルで 0.2 前後) と比べ、若干大きな値であった。しかし、飽和状態ではほぼ 0.5 となり、これは動的三軸試験結果と比べほぼ妥当な値であり、また、通常の飽和土質地盤の動的ポアソン比は 0.47 以上と考えてよく、せん断剛性の小さな軟弱地盤ほど 0.5 に近くなる⁴⁾という一般的の見解とも一致する。

3.2.3 せん断剛性

せん断剛性 G は式(3-2)により、 ρ と V_s から求まる。

ペントナイト単体、ケイ砂混合体とも含水比が高くなると (No.1,2,7 間および No.5,8 間)、 G は大きく減少する。ただし、不飽和状態ではケイ砂混合体と比べペントナイト単体の方が (No.1,5 間および No.3,6 間) 約 1.8~2.1 倍大きいが、飽和状態 (No.7,8 間) では V_s の差が小さくなつたことから、 G の差も小さくなつた。また、不飽和状態のみの比較ではあるが、乾燥密度が大きい方が (No.1,3 間、No.2,4 間および No.5,6) G は、約 1.9~2.4 倍大きくなつた。

一軸圧縮試験から得られた弾性係数 E_{50} についても、同じ乾燥密度において含水比が高いほど低下し¹⁰⁾、また、ケイ砂を混合した場合、同じ含水比条件下ではペントナイト単体と比べ低くなるが、飽和に近づくにつれてその差が小さくなる。ひずみレベルが全く異なるが、弾性領域では E_{50} と本測定結果 G は概ね相関関係があると思われ、 E_{50} の傾向からも本測定結果 G の含水比や乾燥密度、ケイ砂混合の有無に対する挙動の傾向は妥当であると言える。

各条件で取得されたせん断剛性のうち、同じ仕様について動的三軸試験を行つたのは No.2, No.4, No.5, No.7 および No.8 である。本測定結果より算出した G と 2 章の動的三軸試験で得られた G_{max} の比較を表 3-3 に示す。動的三軸試験で得られた G_{max} に比べ、本測定結果より算出した G は、飽和状態ではほぼ近い値となつたが、不飽和状態では若干ばらついた。

弾性波速度の測定結果および動的三軸試験より得られたポアソン比、せん断剛性は、飽和状態では比較的よく一致したが、不飽和状態においては若干ずれが生じた。これには、不飽和状態、低拘束圧下における動的三軸試験の計測精度、弾性波（特に V_s ）測定精度が多少落ちるためであると思われるが、明確な原因は分からなかつた。このため、本測定結果からは、特に不飽和状態における動的三軸試験によるせん断剛性の妥当性については明確には評価できないと言わざるを得ず、ポアソン比の飽和／不飽和条件での違いや、弾性波速度、せん断剛性の含水比や乾燥密度、ケイ砂混合の有無に対する相対的な挙動の傾向の把握にとどまつた。

表 3-2 測定結果

供試体No.	含水比	飽和度(%)	湿潤密度 (Mg m ⁻³)	Vp(m s ⁻¹)	Vs(m s ⁻¹)	ポアソン比 ν	せん断剛性 G(MPa)
1-1	7.16	29.5	1.70	925.2	495.6	0.30	417.7
1-2	7.17	29.6	1.70	900.0	489.8	0.29	408.4
1-3	7.17	29.5	1.70	892.0	484.9	0.29	399.8
1-平均	7.17	29.5	1.70	905.6	490.1	0.29	408.7
2-1	10.72	45.7	1.76	958.6	480.0	0.33	405.4
2-2	10.71	45.8	1.76	958.1	477.9	0.33	402.2
2-3	10.70	45.5	1.76	942.1	476.8	0.33	399.5
2-平均	10.71	45.7	1.76	952.9	478.2	0.33	402.4
3-1	7.16	40.0	1.91	1175.0	651.1	0.28	808.7
3-2	7.16	41.1	1.93	1180.0	646.3	0.29	804.3
3-3	7.16	40.7	1.92	1183.5	673.1	0.26	869.7
3-平均	7.16	40.6	1.92	1179.5	656.8	0.28	827.5
4-1	10.81	62.5	1.97	1258.8	624.3	0.34	769.5
4-2	10.72	63.0	1.98	1273.4	629.9	0.34	786.8
4-3	10.72	62.8	1.98	1257.5	629.1	0.33	784.0
4-平均	10.75	62.7	1.98	1263.2	627.8	0.34	780.1
5-1	8.42	35.3	1.73	591.8	321.9	0.29	178.8
5-2	8.42	35.5	1.73	615.3	324.6	0.31	182.2
5-3	8.42	35.3	1.73	616.6	347.6	0.27	208.6
5-平均	8.42	35.4	1.73	607.9	331.4	0.29	189.9
6-1	7.57	44.0	1.93	921.1	482.9	0.31	453.1
6-2	8.43	48.5	1.94	873.9	499.3	0.26	484.0
6-3	8.43	48.5	1.94	889.4	471.0	0.31	430.6
6-平均	8.43	47.0	1.94	894.8	484.4	0.29	455.9
7-1	25.79	102.1	2.00	1875.0	153.2	0.50	47.0
7-2	25.77	102.0	2.00	1833.9	154.9	0.50	48.0
7-3	25.87	102.3	2.00	1917.9	154.6	0.50	47.9
7-平均	25.81	102.1	2.00	1875.6	154.2	0.50	47.7
8-1	25.45	101.8	2.00	1810.0	123.2	0.50	30.4
8-2	25.54	100.2	1.99	1840.2	124.8	0.50	30.9
8-3	25.54	101.3	1.99	1905.1	123.8	0.50	30.6
8-平均	25.51	101.1	1.99	1851.8	123.9	0.50	30.6

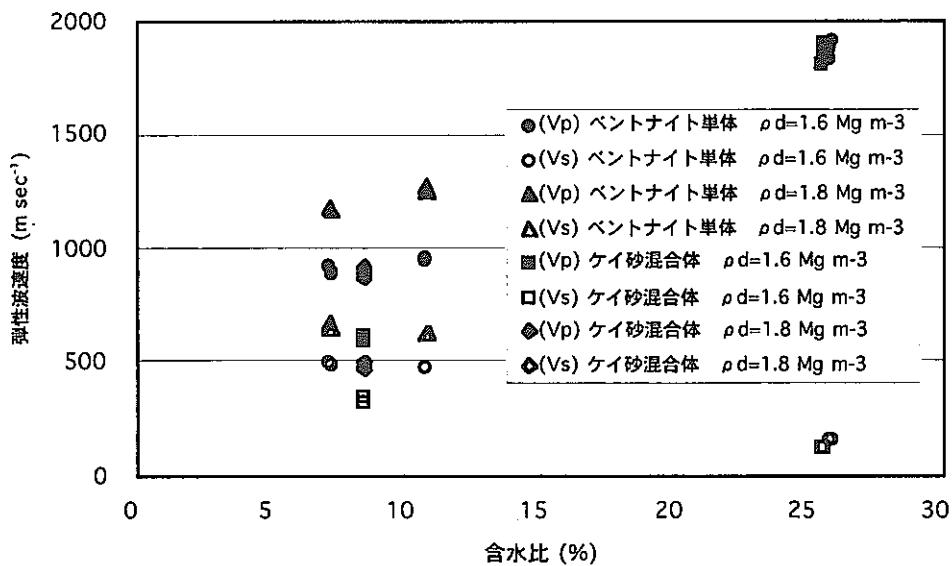


図 3-2 含水比と弾性波速度の関係

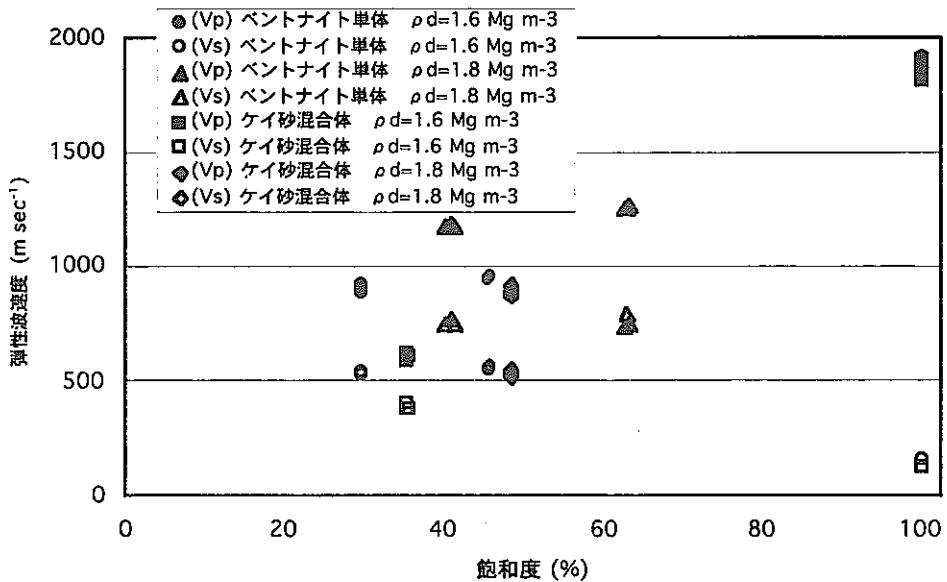


図 3-3 飽和度と弾性波速度の関係

表 3-3 本測定結果より算出した G と動的三軸試験で得られた Gmax の比較

	本測定結果より算出した G (MPa)	動的三軸試験で得られた Gmax* (MPa)
No.2	402	339 (拘束圧 0.098MPa)
No.4	780	867 (拘束圧 0.098MPa)
No.5	190	101 (拘束圧 0.098MPa)
No.7	47.7	47.0 (拘束圧 0.98MPa)
No.8	30.6	29.9 (拘束圧 0.30MPa)

* ただし、動的三軸試験は表記の拘束圧下および、L.D.T.10cycle 目の値

4. 液状化試験

4.1 試験手法

4.1.1 試験概要

本試験は、地震による動的繰返し応力を非排水条件のもとで受ける土の動的強度特性を求める目的としている。実際の動的繰返し応力の振幅と周期は不規則であり、動的応力と地盤内の静水圧密応力との相互関係を試験機内で再現することは困難であるが、今回行った試験は等方圧密した供試体の軸方向にのみ一様振幅の繰返し荷重を非排水条件のもとで載荷して土の動的強さを求めるものである。1章でも述べたように、ペントナイト材料のような塑性指数の大きい粘性土材料の繰返し載荷による破壊タイプは繰返せん断破壊であると考えられるが¹⁾、一般には砂質土の液状化特性を求める場合によく行われる試験であること、以下に詳述する有効応力が0となる液状化の概念に基づき動的強度の設定を行ったことから、以下では試験名を液状化試験と称する。

本液状化試験の供試体に作用する応力、ひずみの概念を図4-1に示す。今回行った液状化試験は、 σ_a （軸応力）= σ_r （側方応力）= σ_c （圧密応力）を負荷して等方圧密した後、水の出入りを許さない非排水状態で σ_r を一定に保ち、軸差応力振幅 $\Delta \sigma_a$ を与えることにより求まる軸ひずみおよび過剰間隙水圧変化から動的強度特性を調べるものである。今回の試験のような非排水せん断試験の場合、せん断中供試体内の体積は一定となる。

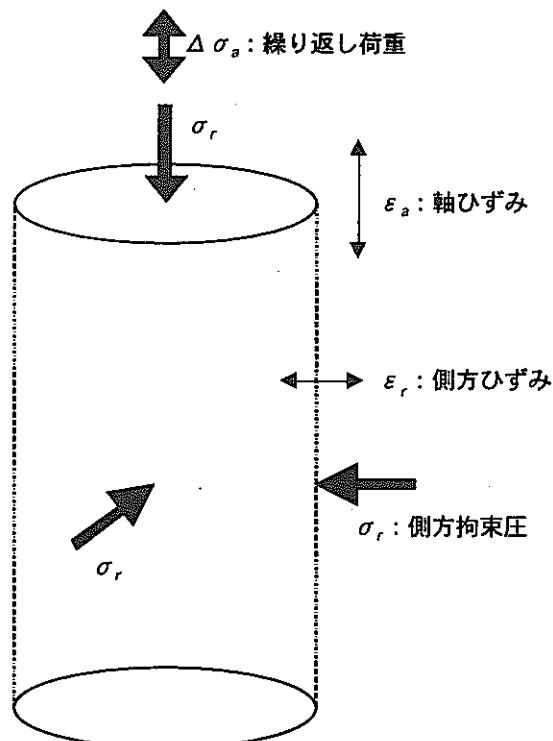


図 4-1 液状化試験概念図

4.1.2 試験条件

試験は、乾燥密度 1.6Mg m^{-3} の飽和ケイ砂混合体（ケイ砂混合率 30wt%）について行った。供試体寸法は直径 50mm、高さ 100mm である。有効拘束圧 σ'_c は 2.94MPa で、軸力の

載荷は 3t 法で圧密終了を確認した後、繰り返し応力振幅比 $\sigma_d / 2\sigma_c'$ (σ_d : 繰返し軸差応力, σ_c' : 圧密終了時有効拘束圧) = 0.241, 0.145, 0.100 の 3 ケースについて、0.1Hz の正弦波を繰り返し応力として与えた。なお、 $\sigma_c' = 0.49 \text{ MPa}$, $\sigma_d / 2\sigma_c' = 0.15$ の条件でも参考ケースとして実施している。試験方法、手順などは基本的に地盤工学会基準³⁾JGS T541 に準拠しているが、繰り返し回数などについては試験中の供試体の挙動を確認しながら、若干の変更を行った。

• 供試体仕様

材 料	: ケイ砂混合ペントナイト (ケイ砂混合率 30wt%)
ケイ砂の配合比	: ペントナイト クニゲル V1 (70wt%)
	ケイ砂 3 号 (15wt%)
	5 号 (15wt%)
寸 法	: 直径 $\phi = 50 \text{ mm}$, 高さ $h = 100 \text{ mm}$
初期乾燥密度	: 1.6 Mg m^{-3}
飽和条件	: 饱和

• 試験条件 (圧密条件, 載荷条件) : 表 4-1 参照

表 4-1 圧密条件, 載荷条件

圧密条件	有効拘束圧 σ_c' (MPa)	2.94	0.49
	側圧 (MPa)	3.136	0.686
	背圧 (MPa)	0.196	0.196
載荷条件	載荷波形	正弦波	
	載荷周波数 f (Hz)	0.1	
	繰返し応力振幅比 $\sigma_d / 2\sigma_c'$	0.241, 0.145, 0.100	0.150

4.1.3 試験手順

(1) 試料調整

自然含水比の粉末ペントナイトとケイ砂を重量比 7 : 3 の割合で十分に混合する。

(2) 圧縮固化

混合した試料の設定した乾燥密度に必要な湿潤重量を測定、圧縮固化体製作治具に投入して、一軸圧縮試験装置を用い、圧縮応力 10MPa 前後で供試体直径 50mm, 高さ 100mm になるように静的に固化させる。

(3) 飽和過程

圧縮固化した供試体の飽和作業は、以下の方法で行った。

① 供試体を飽和セルにろ紙を介して設置する。

- ②上下から真空度を徐々に高めていき、負圧（約-0.1MPa）の状態で24時間保持する。
- ③負圧を徐々に解除して、上下から吸水させた後、通水圧約0.7MPaで30日以上吸水させる。

(4) 供試体の設置

飽和セルから供試体を取り出した後、ろ紙を外し、直径、高さ、重量を測定して、動的三軸試験で用いた装置と同じく、図2-2に示す振動三軸変形試験装置に設置した。なお、本試験では、L.D.T.によるひずみの計測は行っていない。手順は以下の通りに行った。

- ①ポーラスストーンと一体となったペデスタル上にろ紙を敷き、供試体を置く。
- ②供試体側面には、新たにろ紙を巻き、上端面にろ紙を敷く。
- ③供試体にゴムスリープをかぶせ三軸セル内にセットし、上下のゴムスリープをシールする。
- ④周方向、軸方向ギャップセンサを設置する。
- ⑤上下端面からの排水設備のセットを行う。
- ⑥三軸セルをセットし、セル内に水を充満させる。

(5) 圧密過程

供試体を三軸セルに設置した後、上下のコックを開けて排水条件とし、側圧に所定の有効拘束圧をかけて、圧密を開始する。圧密の終了は、3t法により判定し、圧密終了後、B値を測定した。

(6) 載荷過程とデータ処理方法

圧密過程終了後、非排水状態にして、軸差応力振幅を制御する応力制御により、繰返し応力振幅比一定で繰返し軸荷重を載荷した。軸荷重は0.1Hzの正弦波とし、両振幅ひずみDAが10%以上、もしくは繰返し回数N=1000回まで連続加振し、荷重、軸ひずみ、間隙水圧の経時変化より試験結果を整理した。

4.2 試験結果

4.2.1 供試体諸物性

表4-2に、各供試体の初期状態（三軸セルセット前）および圧密過程の諸物性一覧を示す。

圧密終了後に測定されたB値は、地盤工学会基準の0.95以上を満たしていた。

表 4-2 初期状態および圧密過程の物性一覧

有効拘束圧 σ_c' (MPa)		2.94			0.49
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_c'$		0.241	0.145	0.100	0.150
供試体 No.		1	2	3	4
初期 状態	直径 D_0 (cm)	10.00	10.00	10.03	10.04
	高さ H_0 (cm)	5.02	5.01	5.02	5.01
	体積 V_0 (cm ³)	197.92	197.14	198.52	197.92
	湿潤重量 W_w (g)	391.90	391.70	393.00	392.50
	乾燥重量 W_d (g)	305.70	305.59	306.73	306.23
	含水比 ω (%)	28.2	28.2	28.1	28.2
	湿潤密度 ρ_t (Mg m ⁻³)	1.980	1.987	1.980	1.983
	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	1.545	1.550	1.545	1.547
	間隙比 e_0	0.709	0.703	0.709	0.706
圧密 過程	飽和度 S_r (%)	105.0	105.8	104.8	105.3
	軸変位 Δh (cm)	0.327	0.311	0.302	0.021
	体積変化 ΔV (cc)	43.65	41.1	48.7	8.35
	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	1.982	1.958	2.047	1.615
	間隙比 e_c	0.332	0.348	0.289	0.634
	B 値	0.95	0.95	0.95	0.95
圧密時間 (hr.)		504	504	759	336

4.2.2 繰返し載荷中の経時変化、応力経路

各ケースについて、載荷時間と軸差応力 σ_d 、軸ひずみ ϵ_a 、過剰間隙水圧 Δu の関係および有効応力経路を図 4-3～図 4-6に示す。 $\sigma_c'=2.94\text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c'=0.241$ のケース以外は繰返し回数が多いため、100sec の範囲で、載荷初期、載荷途中の 2箇所、載荷終了直前の計 4 箇所を抜き出し、それぞれをグラフ化している。なお、 Δu のみ全経過時間における経時変化も併せて示す。また、応力経路図には、別途実施した圧密非排水三軸圧縮試験¹⁰⁾より得られた破壊包絡線も併せて示す。

図より、 $\sigma_c'=2.94\text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c'=0.241$ のケース以外の 1,000 回の載荷を行ったケースでは、載荷途中で軸差応力、軸ひずみ、過剰間隙水圧が若干シフトしていることが分かる。これは、操作の都合上一旦途中で試験を中断したためにデータがドリフトしたからである。ただし、各データともドリフト量はごく微少であり、試験結果全体に影響するものではないため、データの補正等は行っていない。

有効拘束圧 $\sigma_c'=2.94\text{ MPa}$ のケースにおいて、繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_c'=0.241$ では繰り返し回数 0.7 回で両振幅ひずみが 10% に達し、2 回程度で試験を終了した。 $\sigma_d/2\sigma_c'=0.145$ では繰り返し回数 672 回で両振幅ひずみが 1% に達し、1,000 回で試験を終了した。 $\sigma_d/2\sigma_c'=0.100$ では 1,000 回載荷したが、両振幅ひずみは 1% にも達しなかった。 $\sigma_c'=0.49\text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c'=0.150$ のケースでも 1,000 回載荷したが、両振幅ひずみは 1% にも達しなかった。

$\sigma_c' = 2.94 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.241$ のケースは、非常に短時間で両振幅ひずみが 10%に達したが、図より最初の圧縮過程で軸ひずみが約 5%の大きな変形が生じ、次の伸張、圧縮過程で急激に供試体中央に生じた弱部で破壊が進展し、それにより応力が追従し切れていないことが分かる。応力経路図から破壊包絡線には達していないが、後述するような過剰間隙水圧分布の局所的なばらつきが生じたため、供試体中央部では部分的に破壊包絡線に達した可能性がある。

1 サイクル目（圧縮過程）における過剰間隙水圧の発生量は、軸差応力に対して $\sigma_c' = 2.94 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.145$ のケースで約 0.8%, $\sigma_c' = 2.94 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.100$ のケースで約 0.3%, $\sigma_c' = 0.49 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.150$ のケースで約 12%程度であり、過剰間隙水圧としては非常に小さい。載荷中の過剰間隙水圧の蓄積も非常に緩やかであり、1000 回の載荷終了時の過剰間隙水圧比（過剰間隙水圧 Δu / 有効拘束圧 σ_c' ）は、 $\sigma_c' = 2.94 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.145$ のケースで約 0.2, $\sigma_c' = 2.94 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.100$ のケースで約 0.1, $\sigma_c' = 0.49 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.150$ のケースで約 0.5 であった。したがって、有効応力経路は全応力経路とほぼ平行となる 1/3 の傾きを保ちつつ、 Δu の増加、すなわち p' の減少に従い、緩やかに左へシフトするような挙動を示した。過剰間隙水圧の発生が小さい理由としては以下のようなものが考えられる。

- 1) 供試体が十分に飽和していない
- 2) 間隙水圧測定経路が十分な剛性をもっていない
- 3) 間隙水圧計のキャリブレーションのミス
- 4) 供試体内の間隙水圧の変化が追従しない

今回の試験では B 値は 0.95 を確保しており、また、過去に実施したベントナイト試験の経験上、0.95 以上の B 値があればほぼ飽和材料としての挙動が認められることから 1)の影響は小さいと思われ、また、試験手順や装置の構造上にも問題はなかったことから 2)や 3)は考えられない。考え得る原因としては、ベントナイトは低透水性であるため軸力の載荷により発生する過剰間隙水圧は短期的には一様にはならずにある分布を持ち、今回の試験の載荷周波数 0.1Hz 程度では水圧が再配分され一定になることなく応力の変動が繰り返され間隙水圧の変化に局所的なばらつきが生じ、間隙水圧を測定している供試体端部では中央部に比べ過剰間隙水圧の発生が小さくなるため、あるいは、短周期の載荷では載荷応力のほとんどが有効応力で負担してしまい、過剰間隙水圧が発生しないと考えられる。すなわち、ベントナイトの様な一般土質材料に比べかなり透水性が低い材料では、載荷周波数が間隙水圧挙動に大きな影響を及ぼすと考えられる。粘性土の繰返せん断挙動に対する周波数依存性を示した研究例は多いが、載荷周波数が高いほど同一の繰返し回数において軸ひずみ両振幅、残留間隙水圧比とも小さく現れる傾向にあり、これは、周波数が大きなものほど供試体内的含水比がばらつくため、間隙水圧分布やひずみの不均一性が生じることが一因であるという報告もあり¹²⁾、今回の試験でも同様な現象が起きていた可能性がある。

このように、周波数依存性に関しては課題を残したが、 $\sigma_c' = 2.94 \text{ MPa}$ のケースについて、両振幅ひずみ DA、過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma_c'$ に関するデータの範囲で繰返し回数 N_1 と繰返し応力振幅比 $\sigma_d / 2\sigma_c'$ の関係を図 4-2 に示す。両振幅ひずみについては、0.34%，1.0%，10%，過剰間隙水圧比については 0.1 となる繰返し回数についてまとめた。データ数が少ないため明確な考察は行えないが、図中の両振幅ひずみの傾きと過剰間隙水圧比の傾きが異なっているのが分かる。

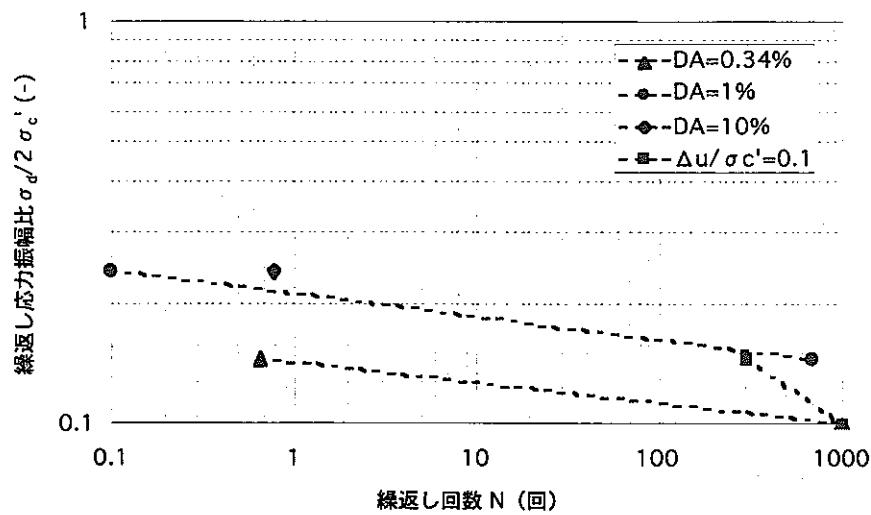
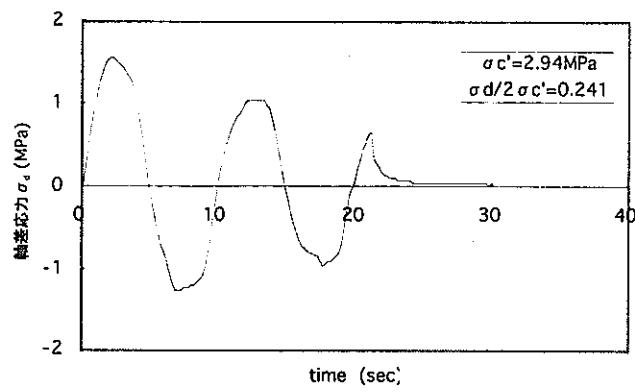
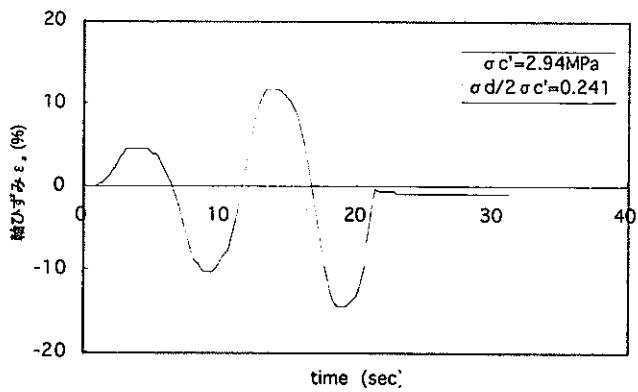


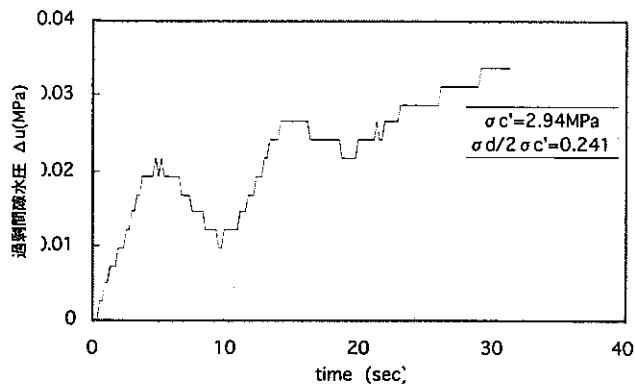
図 4-2 繰返し回数と繰返し応力振幅比の関係



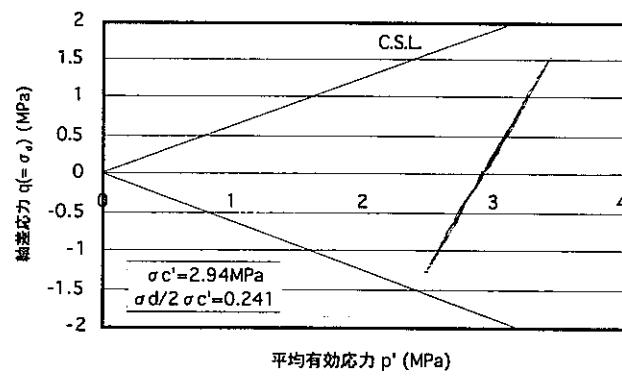
(a) 軸差応力の経時変化



(b) 軸ひずみの経時変化

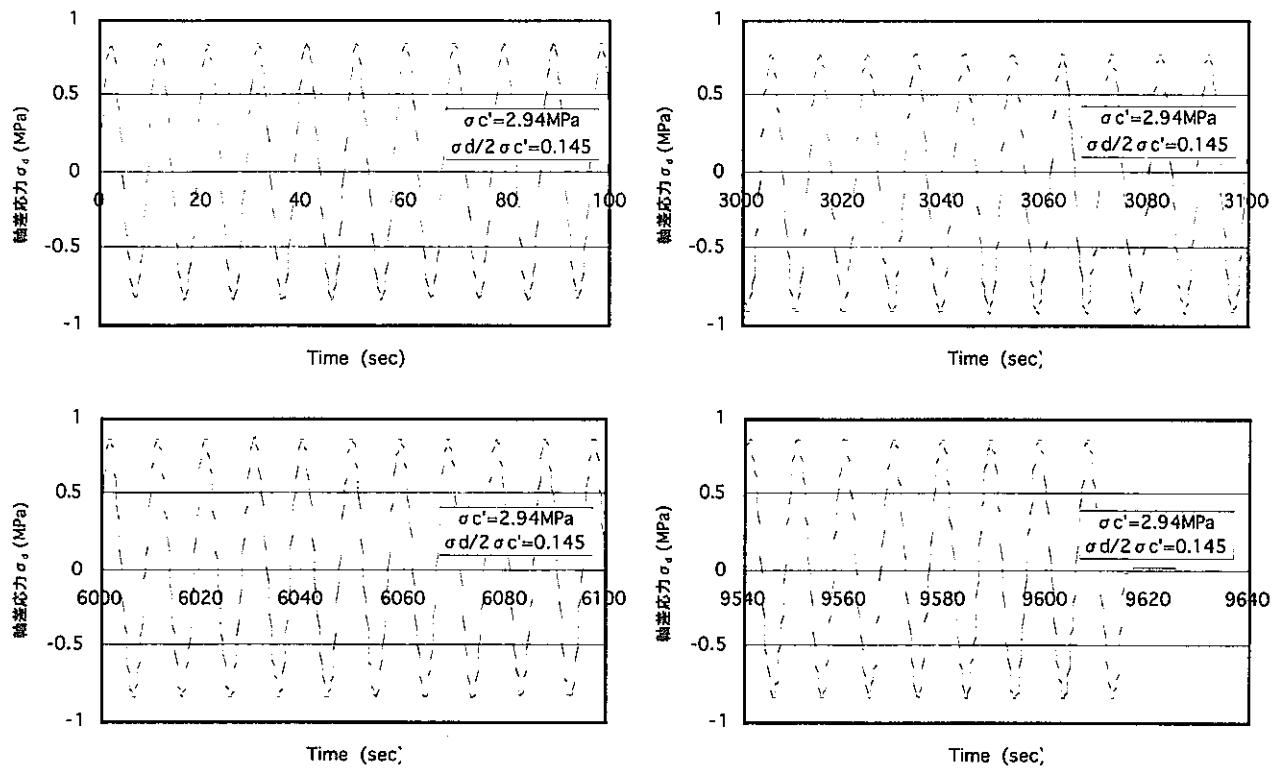


(c) 過剰間隙水圧の経時変化

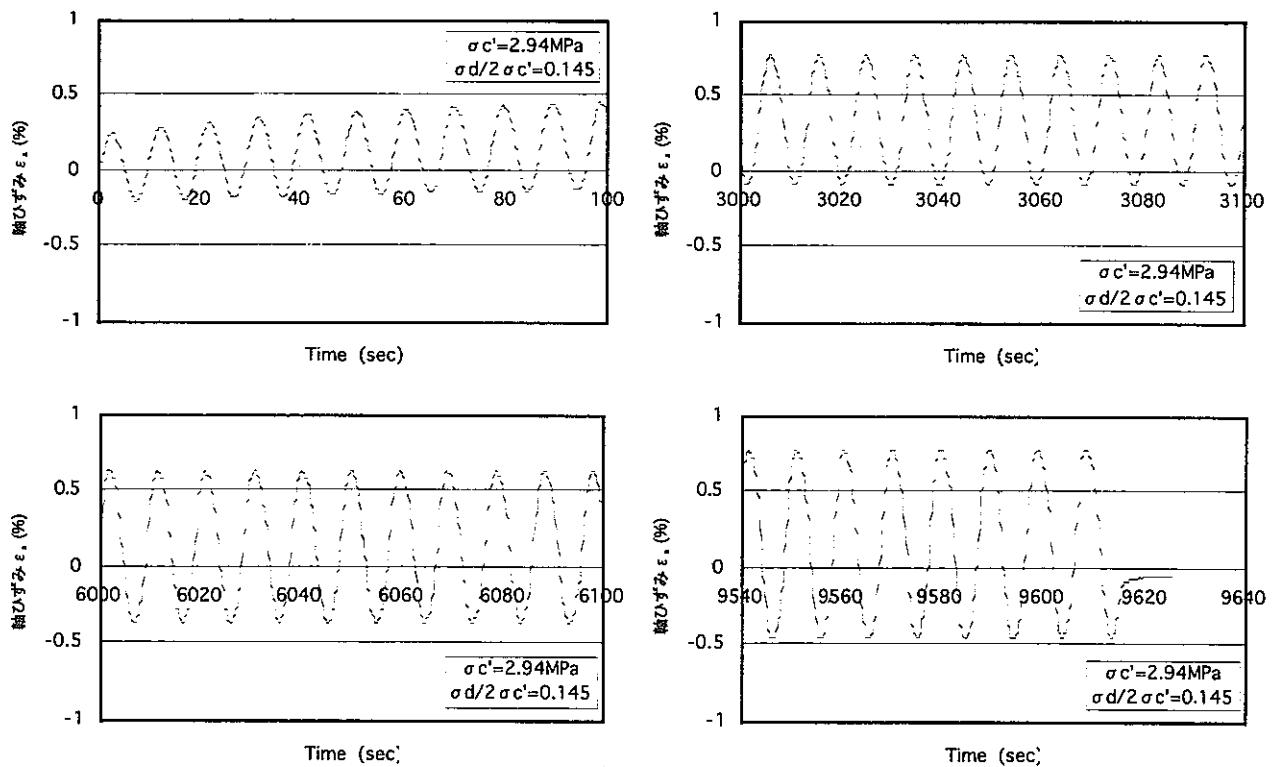


(d) 応力経路

図 4-3 液状化試験結果 ($\sigma c' = 2.94 \text{ MPa}$ $\sigma d/2 \sigma c' = 0.241$)



(a) 軸差応力の経時変化



(b) 軸ひずみの経時変化

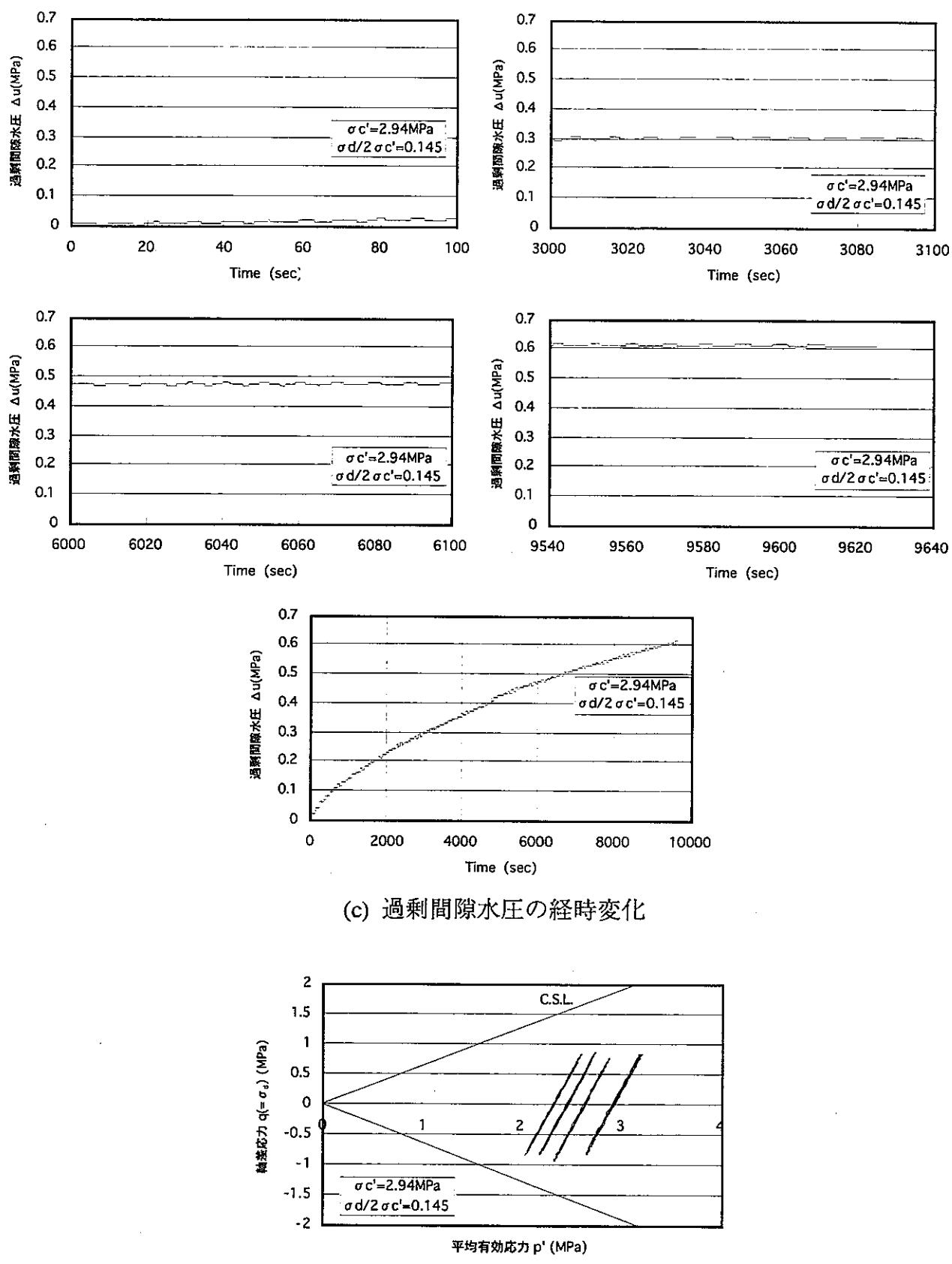
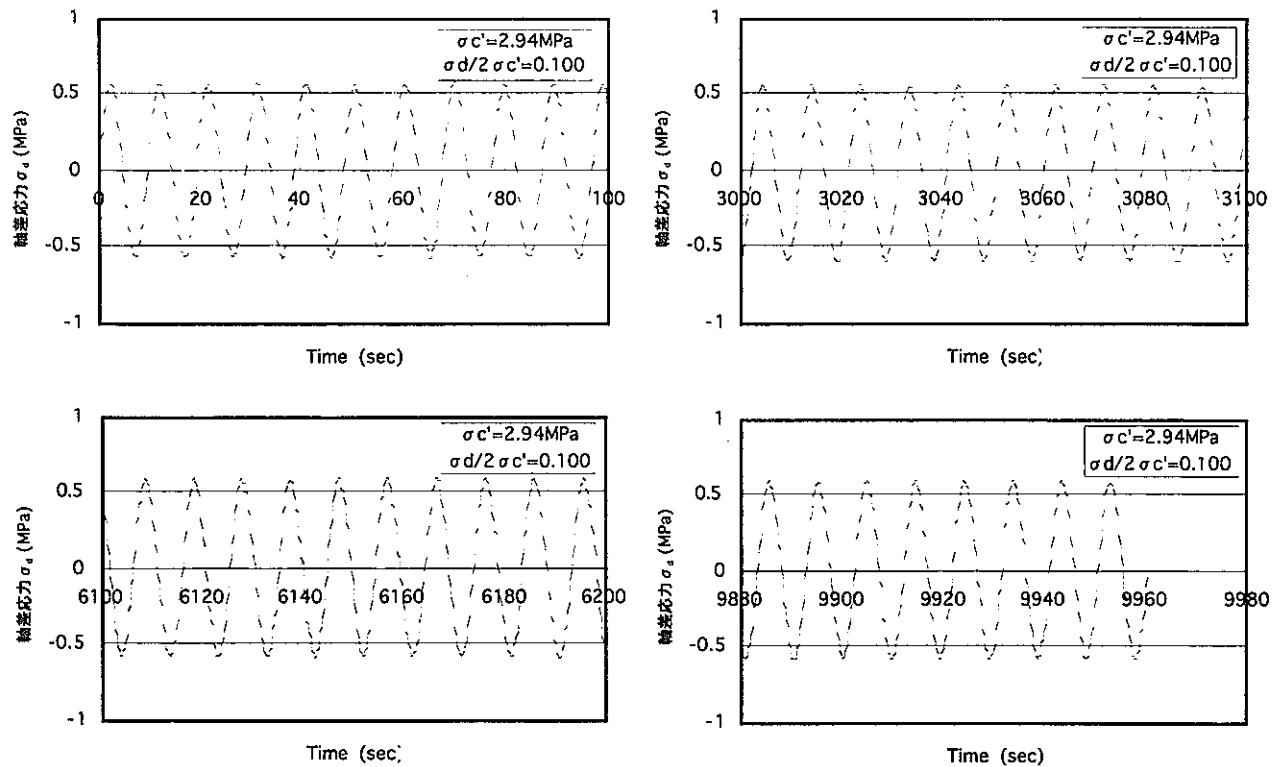
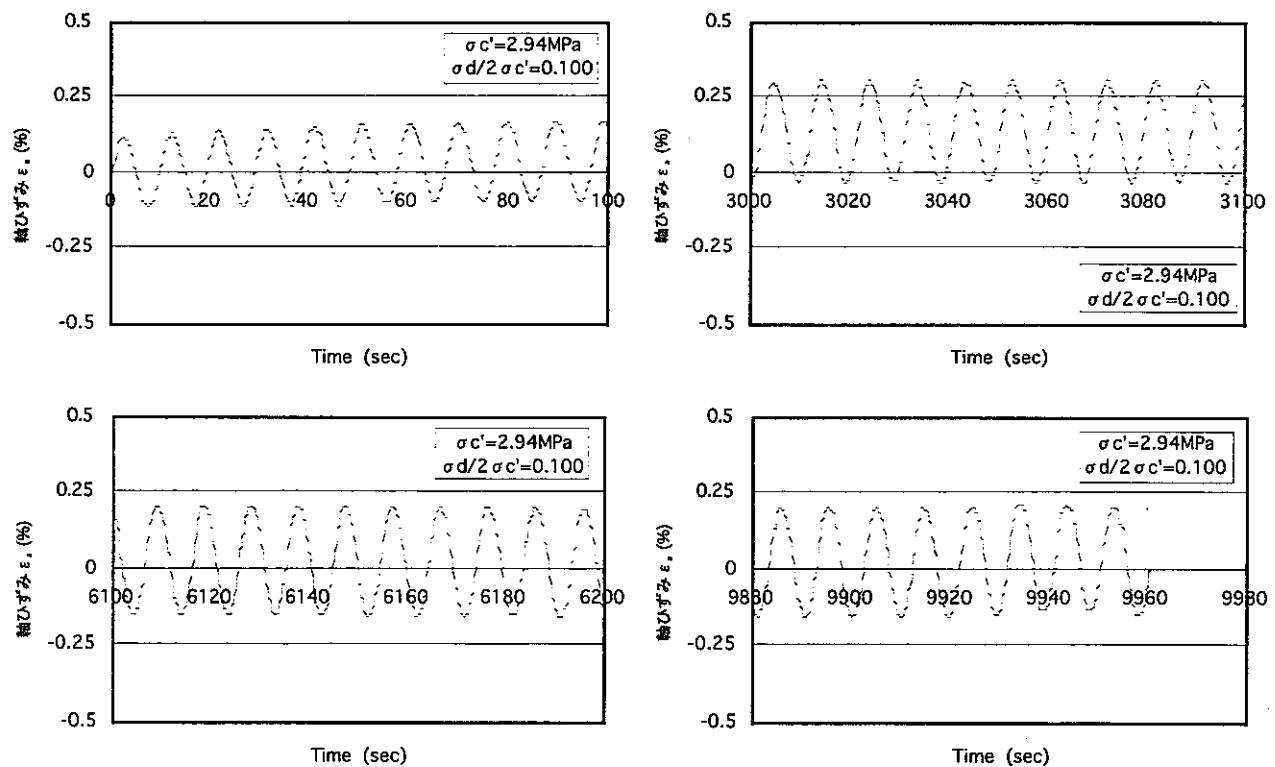


図 4-4 液状化試験結果 ($\sigma' c = 2.94 \text{ MPa}$ $\sigma d / 2 \sigma' c = 0.145$)



(a) 軸差応力の経時変化



(b) 軸ひずみの経時変化

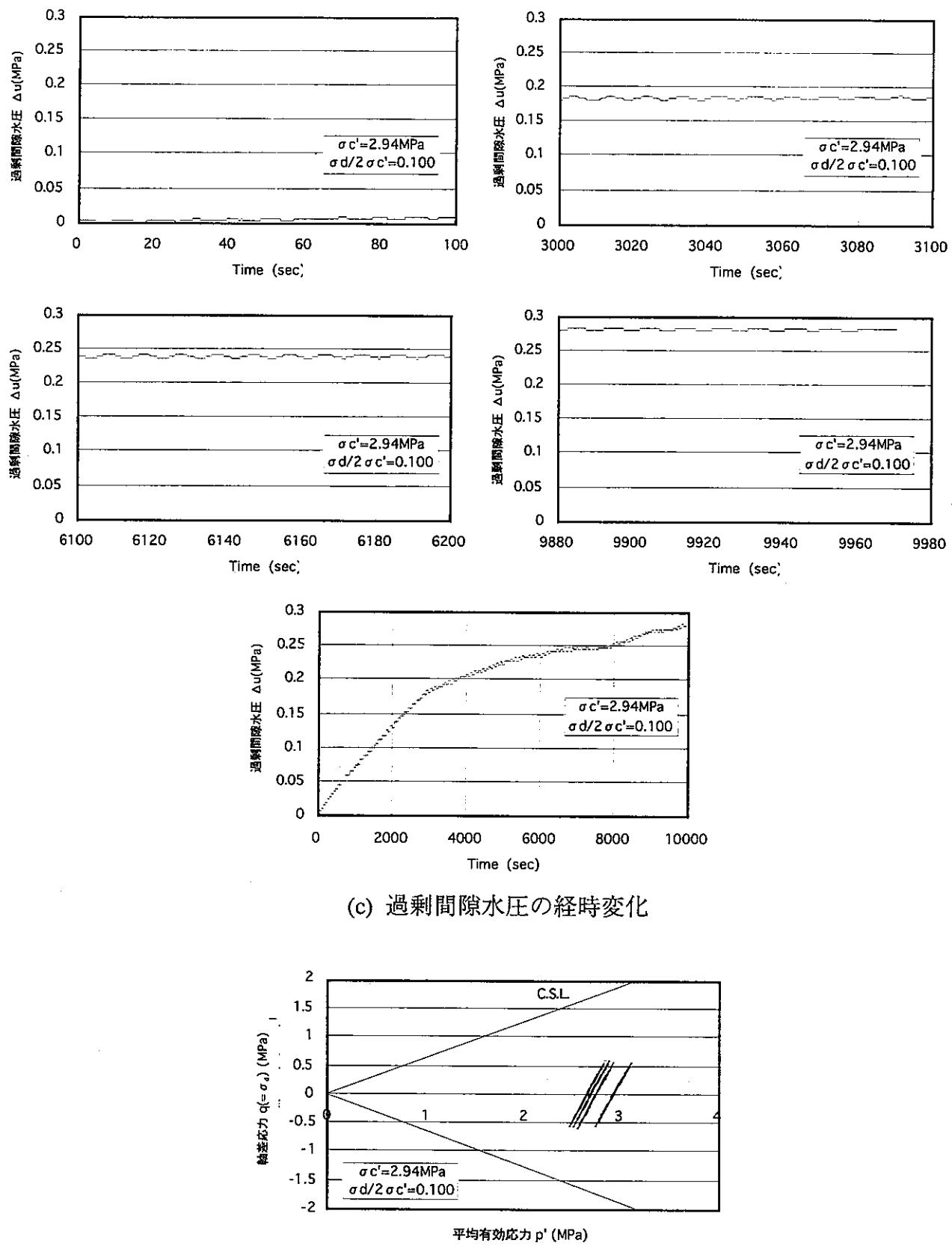
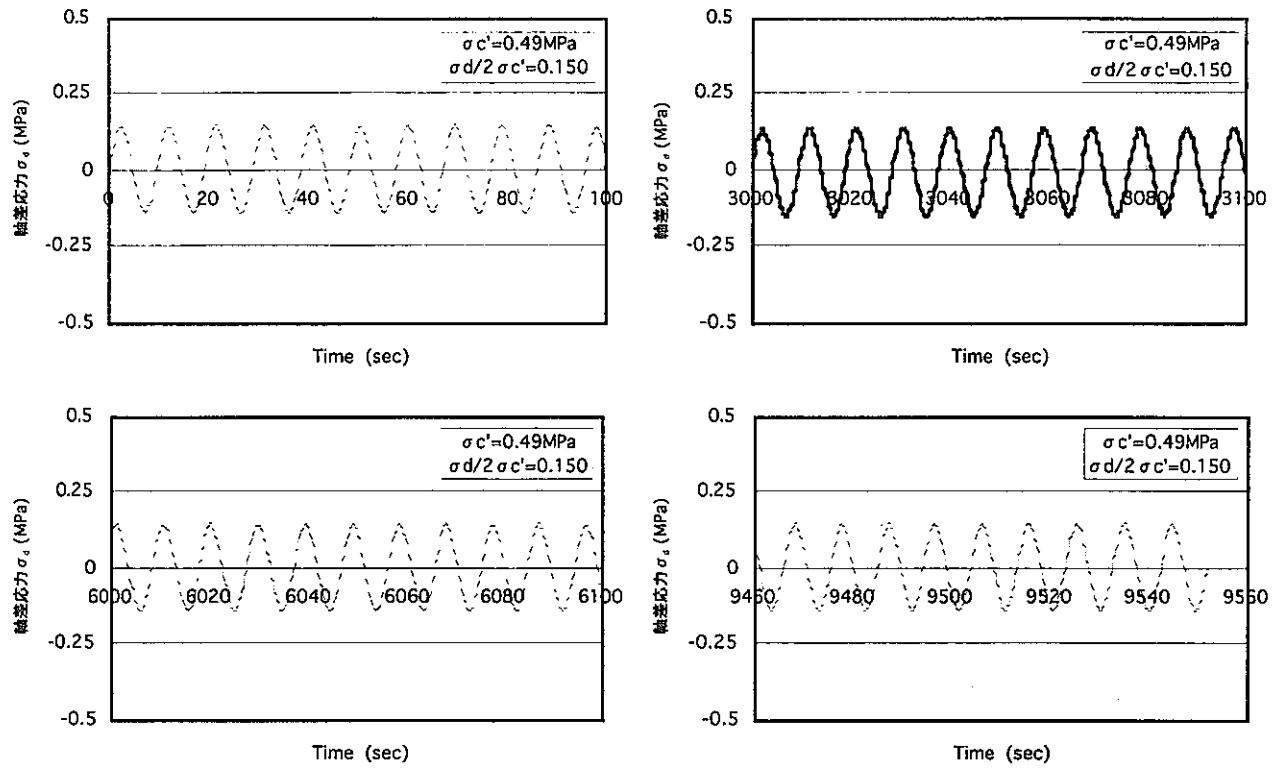
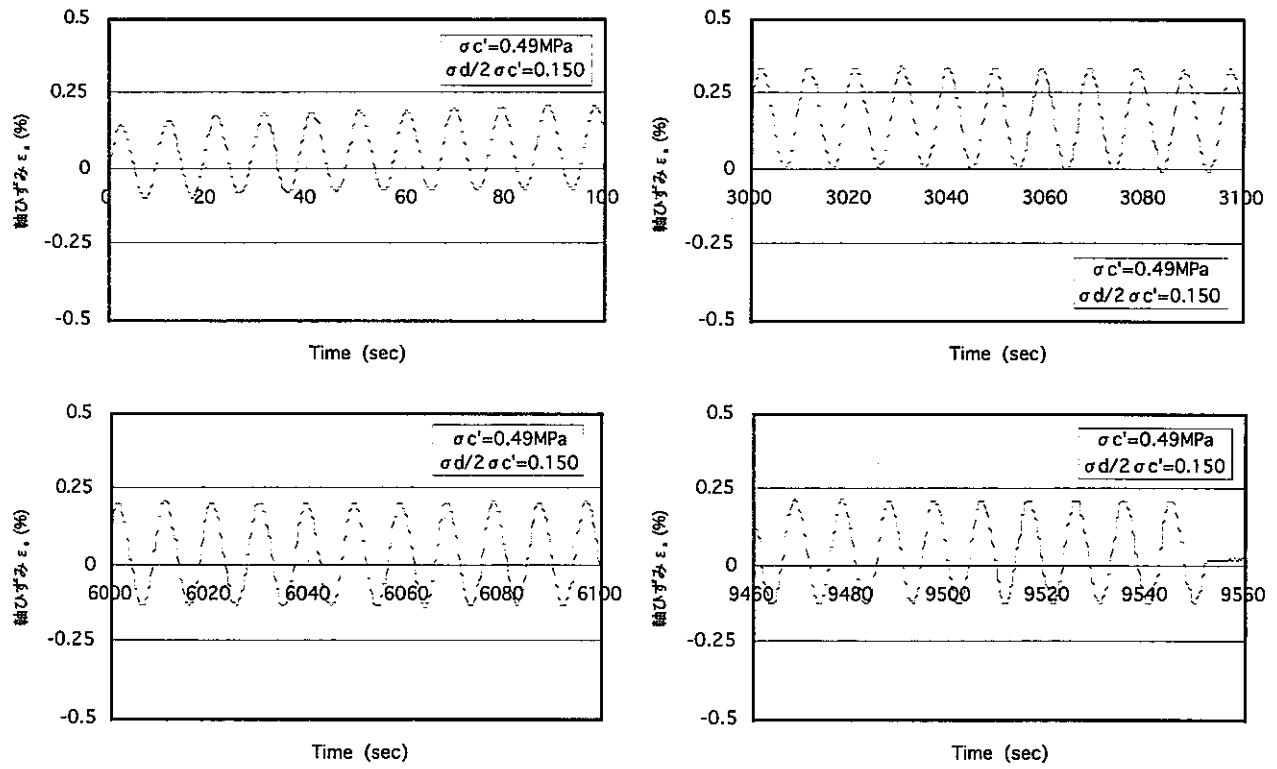


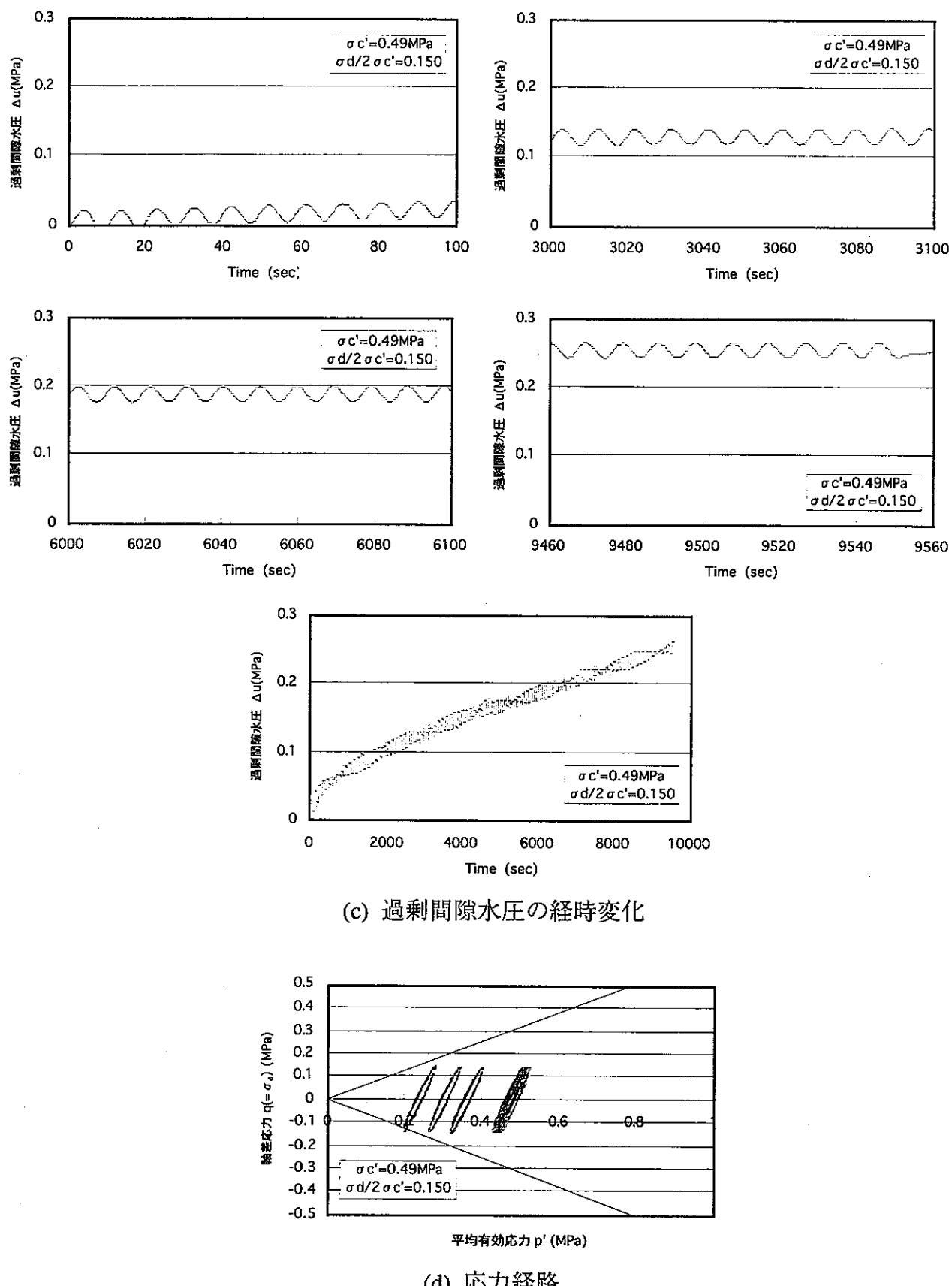
図 4-5 液状化試験結果 ($\sigma'c=2.94\text{ MPa}$ $\sigma'd/2\sigma'c=0.100$)



(a) 軸差応力の経時変化



(b) 軸ひずみの経時変化

図 4-6 液状化試験結果 ($\sigma' c' = 0.49 \text{ MPa}$ $\sigma d / 2 \sigma' c' = 0.150$)

4.2.3 動的強度の推定

以上の少ないデータから動的強度を推定するのは非常に困難である。粘性土の場合、前述のように破壊を初期液状化によって定義することは不可能であるため、ある所定ひずみの発生によって破壊を定義せざるを得ない。通常破壊ひずみはその材料特性を考慮して、例えば DA=5%または 10%と定義するが、短時間で DA=10%に達した $\sigma_c' = 2.94 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.241$ のケース以外でこれを推定することは不可能である。

そこで、ニアフィールドの耐震安定性解析¹³⁾では地震時の過剰間隙水圧の発生状況を確認することが目的の一つであることから、過剰間隙水圧の観点から動的強度を設定することとした。すなわち、繰り返し回数と過剰間隙水圧の関係を保守的に外挿することで有効応力が 0 となる（過剰間隙水圧比が 1.0 となる）繰り返し回数を動的強度（液状化回数）と定義した。このような液状化の概念を適用する場合、砂質土では繰り返し回数と過剰間隙水圧の関係を Seed らによる間隙水圧の上昇式¹⁴⁾などにフィッティングさせてパラメータを設定するが、図 4-3～図 4-5(c)を見ると、1)今回の結果では繰り返し載荷終了時以降の挙動が分からぬこと、2)繰り返し回数が増えるにつれ過剰間隙水圧の増加率は減少するが載荷初期の段階はほぼ線形関係であること、3)そのため載荷初期の線形関係で外挿すればおそらく保守側の設定であることから、繰り返し回数と過剰間隙水圧の関係を載荷初期の線形関係で外挿し、過剰間隙水圧比が 1.0 となる液状化繰り返し回数を求めた。液状化繰り返し回数 N_l と応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_c'$ の関係を図 4-7に示す。なお、図中には参考ケースである $\sigma_c' = 0.49 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.15$ によるデータも加えている。図より $\sigma_c' = 0.49 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.15$ のデータ以外の $\sigma_c' = 2.94 \text{ MPa}$ の 3 点では、結果的には両対数表示で概ね直線で近似できることがわかる。ただし、 $\sigma_c' = 2.94 \text{ MPa}$, $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.241$ のケースでは繰り返し回数が 2 回と少なく、また、既にせん断破壊に至っているため、この関係の適用範囲は少なくとも $\sigma_d/2\sigma_c' < 0.241$ であることを注記しておく。

また、この近似曲線を次式のようにすると¹⁵⁾, $R_{l20}=0.592$, $\gamma=-3.11$ と設定でき、一定振幅波形における任意の応力比条件下での液状化回数が求まる。

$$N_l/20 = (R_l/R_{l20})^\gamma \quad (4-1)$$

ここで、 N_l は液状化繰り返し回数、 R_l は液状化応力比、 R_{l20} は液状化回数 20 回の場合のせん断応力比、 γ は実験定数である。

今回は少ない試験データから上述のような液状化の概念により動的強度を設定したが、 $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.241$ と 0.145 の間で大きく動的挙動が異なるため、この間の応力比をパラメータとした、また周波数依存性を考慮したより多くの試験データによりベントナイト材料の動的挙動メカニズムを把握し、動的強度を求める必要がある。

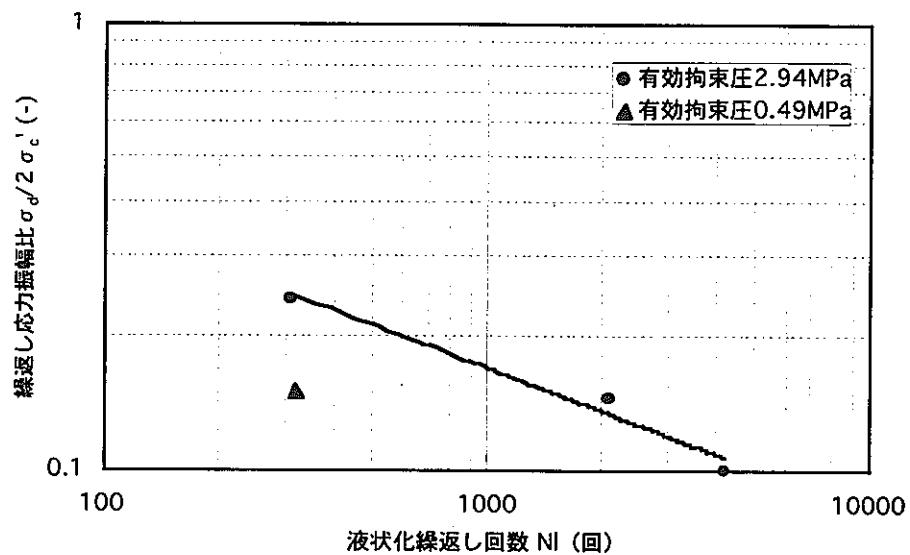


図 4-7 液状化繰り返し回数と応力振幅比の関係

5. まとめ

動的力学特性に関する各種試験を実施し、結果についてとりまとめた。以下に各試験毎の結果を要約する。

【動的三軸試験】

乾燥密度 1.6, 1.8Mg m⁻³ のベントナイト単体、乾燥密度 1.6Mg m⁻³ の 30wt%ケイ砂混合体それぞれ、飽和状態、不飽和状態の供試体を用いて、有効拘束圧を変えて動的三軸試験を行った結果、

- 1) 動的ポアソン比は、飽和条件ではほぼ 0.5 に近い値、不飽和条件では計測精度が下がるため、0 近く～0.3 の間でばらついた。
- 2) 試験中の軸変位は、L.D.T. とギャップセンサで計測したが、一般的に言われるギャップセンサのペディングエラーはほとんどなかった。よって、端面を丁寧に仕上げ、拘束圧がある程度高ければ、圧縮成形ベントナイトの三軸試験はギャップセンサでも信頼性のあるデータが得られる。
- 3) 等価せん断剛性率、履歴減衰定数は土質材料一般の非線形性と同様なひずみ依存性が認められた。
- 4) 飽和条件では、最大せん断剛性率 G_{max} と有効拘束圧の関係は各仕様ごとに原点を通る直線で近似された。
- 5) せん断剛性率を最大せん断剛性率で正規化した剛性比は、せん断ひずみ振幅との関係において、有効拘束圧、飽和／不飽和、密度の違い、ケイ砂混合の有無によらず、全てのケースでほぼ一定の範囲におさまった。
- 6) 履歴減衰定数も同様に、(剛性率の結果に比べてばらつきは大きいが) せん断ひずみ振幅との関係において、有効拘束圧、飽和／不飽和、密度の違い、ケイ砂混合の有無によらず、全てのケースでほぼ一定の範囲におさまった。
- 7) R-O モデルによる試験結果のフィッティングを行った結果、R-O モデルのパラメータを適切に設定することによって試験結果をうまく表現することができた。

【弾性波速度の測定】

不飽和状態の乾燥密度 1.6, 1.8Mg m⁻³ のベントナイト単体、30wt%ケイ砂混合体、飽和状態の乾燥密度 1.6Mg m⁻³ のベントナイト単体、30wt%ケイ砂混合体を用いて、弾性波速度の測定を行った結果、

- 1) 求められたポアソン比は、不飽和状態では 0.3 前後で動的三軸試験結果より得られた動的ポアソン比に比べて若干大きな値、飽和状態ではほぼ 0.5 で動的三軸試験結果とくらべ妥当な値であった。
- 2) 求められたせん断剛性は、飽和状態では動的三軸試験結果より得られたせん断剛性に比べてほぼ近い値となったが、不飽和状態では若干ばらついた。

【液状化試験】

乾燥密度 1.6Mg m^{-3} の 30wt%ケイ砂混合体を用いて、繰返し応力振幅比を変えて液状化試験を行った結果、

- 1) 繰返し応力振幅比が 0.241 のケースは、繰返し回数 0.7 回でせん断破壊し、0.145, 0.100 のケースは 1,000 回載荷しても、両振幅ひずみは 1% 前後にしか達しなかった。
- 2) 載荷中の過剰間隙水圧の発生量は非常に小さく、これは、ペントナイト供試体の低透水性や載荷周波数が早かったため、供試体内部の水圧分布が局所的にばらついたことなどが原因と考えられる。
- 3) 各試験結果の繰返し回数と過剰間隙水圧の関係から、間隙水圧比が 1.0 となる繰返し回数（液状化繰返し回数）を保守的に外挿することによって求めた。液状化繰返し回数と繰返し応力振幅比との関係は、両対数軸上で概ね直線で近似できた。

これらの動的力学特性データは、人工バリアシステムの耐震安定性評価¹³⁾などに用いられる重要なデータであるが、データ数はまだ十分とは言えない。今後も引き続きデータの充実を図り、より精度の高い検討を行う必要がある。

謝辞

動的三軸試験、液状化試験の実施にあたり、長期間にわたり鹿島建設(株)の田中益弘氏の御協力を得た。ここに感謝の意を記します。

【参考文献】

- 1) 兵藤正幸, 内田一徳 (1998) : 粘性土の動的性質 2.粘性土の動的問題の分類, 土と基礎, Vol.46, No.6, pp.53-58
- 2) Ishikawa,H., Amemiya,K., Yusa,Y. and Sasaki,N. (1990) : Comparison of Fundamental Properties of Japanese Bentonites as Buffer Material for Waste Disposal, Proc. of the 9th International Clay Conference, Sci. Géol.,Mém.,87, pp.107-115
- 3) 地盤工学会 (1996) : 土質試験の方法と解説
- 4) 今井常雄, 横田耕一郎, 今野政志, 栗田好文 (1979) : 振動三軸試験機を用いた動ポアソン比の測定について, 第14回土質工学研究発表会, pp.517-pp.520
- 5) 土の動的変形定数試験方法基準化委員会 (1994) : 室内繰返し載荷試験による堆積軟岩の変形特性に関する全国一斉試験の実施と試験結果の解析, 土と基礎, Vol.42, No.11, pp.89-92
- 6) 龍岡文夫, 木幡行宏 (1994) : ベディングエラー, 土と基礎, Vol.42, No.9, pp.53-55
- 7) 内田一徳 (1998) : 粘性土の動的性質 5.粘性土の動的性質(その1), 土と基礎, Vol.46, No.11, pp.47-52
- 8) 足立紀尚, 龍岡文夫 (1981) : 土木学会編 新体系土木工学 18 土の力学(III) 一圧密・せん断・動的解析一, 技報堂
- 9) 並河 努, 菅野 肇 (1997) : 緩衝材の圧密特性, 動燃技術資料 PNC TN8410 97-051
- 10) 高治一彦, 鈴木英明 (1999) : 緩衝材の静的力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-041
- 11) 善 功企, 山崎浩之, 梅原靖文 (1987) : 2.地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol.26, No.1, pp.41-113
- 12) 兵動正幸, 杉山太宏, 山本陽一, 河田頼治 (1994) : 繰返せん断を受ける正規圧密および過圧密粘土の間隙水圧とひずみの評価, 土木学会論文集, No.487, III-26, pp.79-88
- 13) 谷口航, 高治一彦, 杉野弘幸, 森康二:ニアフィールドの耐震安定性解析, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-054
- 14) Seed,H.B., Martin,p.p. and Lysmer,J. (1976) : Pore-Water Pressure Changes during Soil Liquefaction, Proc. ASCE, Vol.102, GT4, pp.323-346
- 15) 国生剛治, 江刺靖行, 桜井彰雄 (1981) : 砂層の液状化現象についての数値シミュレーション, 電力中央研究所 研究報告, 381023