

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第3065号

土木研究所資料

粗粒材の動的せん断強度に関する調査報告書

平成4年2月

建設省土木研究所
機械施工部動土質研究室

Copyright © (1992) by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

粗粒材の動的せん断強度に関する調査報告書

動土質研究室 室 長 古賀 泰之

研究員 古関 潤一

要 旨

本資料は、フィルダムに用いられる粗粒材の動的せん断強度に関して、1990年2月までに発表されている文献と、動土質研究室の関連する研究成果をもとに検討したものである。粗粒材の液状化事例と室内試験結果、液状化特性に及ぼす諸要因影響、及び粗粒材の液状化強度の予測方法についてまとめた。

キーワード：粗粒材，動的せん断強度，要素試験，大型三軸試験，フィルダム，礫

本文目次

	ページ
1. 粗粒材は液状化するか？	1
1.1 粗粒材の液状化事例	1
1.2 フィルダムに用いられる材料の粒度、透水性	1
1.3 排水条件の影響	2
1.4 メンブレンコンプライアンスの影響	3
1.5 粗粒材の液状化試験の例	4
2. 粗粒材が液状化した場合、どのような特性を示すか？	5
2.1 密度の違いによる影響	5
2.2 初期けん断応力による影響	6
2.3 拘束圧の違いによる影響	7
2.4 圧密時間の影響	8
2.5 過圧密比の影響	8
3. 粗粒材の液状化強度をどのように予測するか？	8
3.1 原位置貫入試験	8
3.2 凍結サンプリング	8
3.3 相似粒度の攪乱試料	8
3.4 静的排水試験結果からの推定	9
4. まとめ	9
参考文献	10

図表目次

	ページ
図1 液状化した粗粒材の粒度分布 ¹⁾	12
図2 堤体材料の適正範囲 ²⁾	12
図3 建設省所管のフィルダムで用いられている粒度分布 ³⁾	13
図4 粗粒材の透水係数と D_{10} の関係 ⁴⁾	14
図5 計算された過剰間隙水圧分布 ⁵⁾	15
図6 計算された過剰間隙水圧分布 ⁶⁾	16
図7 無次元量 π_1 と排水・非排水条件 ⁷⁾	16
図8 部分排水条件での液状化強度（試験結果） ⁶⁾	17
図9 非排水試験と部分排水試験の比較 ⁶⁾	18
図10 部分排水条件での液状化強度（計算結果） ⁶⁾	19
図11 メンブレンコンプライアンスの模式図 ¹⁾	20
図12 三軸供試体の中央に円筒形の真ちゅうを入れる方法 ¹⁶⁾	21
図13 三軸供試体の半径方向のひずみを直接測定する方法 ¹³⁾	21
図14 メンブレンの内側に液体ゴムを塗る方法による体積ひずみ特性 ¹⁴⁾	22
図15 メンブレンの外側に充填材を塗る方法 ¹⁾	22
図16 メンブレンの外側に充填材を塗る方法による液状化強度曲線 ¹⁵⁾	23
図17 供試体の間隙に砂を流し込む方法 ¹⁾	24
図18 供試体の間隙に砂を流し込む方法による液状化強度曲線 ¹⁾	25
図19 等体積せん断を行う方法 ¹⁶⁾	25
図20 等体積せん断試験と従来の試験の比較 ¹⁷⁾	26
図21 システムコンプライアンス比 C_R と液状化強度の補正量の関係 ¹⁸⁾	26
図22 過剰間隙水圧の上昇過程での振幅から C_R を求める方法 ¹⁹⁾	27
図23 材料の平均粒径と供試体の大きさより補正する方法 ¹⁾	28
図24 Leeら ²⁰⁾ 、Wongら ²¹⁾ の試験結果 ¹⁸⁾	28
図25 Banerjeeら ¹³⁾ の試験結果	29
図26 佐々木ら ⁴⁾ の試験結果	30
図27 松本ら ²²⁾ の試験結果	30
図28 ゆろい砂の液状化試験結果の例（時刻歴）	31

図29	密な砂の液状化試験結果の例（時刻歴）	32
図30	ゆるい砂の液状化試験結果の例（応力・ひずみ関係）	33
図31	密な砂の液状化試験結果の例（応力・ひずみ関係）	33
図32	ゆるい砂の液状化試験結果の例（有効応力経路）	34
図33	密な砂の液状化試験結果の例（有効応力経路）	34
図34	ゆるい砂と密な砂の液状化強度曲線の比較 ²³⁾	35
図35	相対密度と液状化強度の関係（ひずみを変えた場合） ²³⁾	36
図36	相対密度と液状化強度の関係（繰返し回数を変えた場合） ²³⁾	37
図37	フィルダムの静的応力分布の例 ¹³⁾	39
図38	せん断応力方向の反転がある場合の試験結果（時刻歴）	40
図39	せん断応力方向の反転がない場合の試験結果（時刻歴）	41
図40	せん断応力方向の反転がある場合の試験結果（応力・ひずみ関係）	42
図41	せん断応力方向の反転がない場合の試験結果（応力・ひずみ関係）	42
図42	せん断応力方向の反転がある場合の試験結果（有効応力経路）	43
図43	せん断応力方向の反転がない場合の試験結果（有効応力経路）	43
図44	液状化強度に及ぼす初期せん断応力の影響 ²⁴⁾	44
図45	初期せん断応力を変えた液状化試験結果 ¹³⁾	45
図46	初期せん断応力を考慮した地震時変形特性の評価例 ¹³⁾	46
図47	初期せん断応力の影響に関する補正係数 ²⁵⁾	47
図48	拘束圧と破壊時の体積ひずみの関係 ²⁶⁾	48
図49	拘束圧と破壊時の体積ひずみの関係 ²⁷⁾	49
図50	拘束圧の影響に関する補正係数 ²⁵⁾	50
図51	液状化強度に及ぼす圧密時間の影響 ²⁸⁾	50
図52	液状化強度に及ぼす圧密時間の影響 ¹³⁾	51
図53	液状化強度に及ぼす過圧密比の影響 ²⁸⁾	51
図54	静的排水試験における最大収縮点	52
図55	液状化強度と静的排水試験における収縮特性の関係	52

1. 粗粒材は液状化するか？

1.1 粗粒材の液状化事例

粗粒材が液状化したケースヒストリィとして、いくつかのケースが報告されている。これらの粒度分布を図1に示す¹⁾。

- a) 1948年の福井地震における、扇状地の礫質沖積砂の液状化。
- b) 1964年のアラスカ地震における、礫質砂及び砂質礫を含む沖積層のフロースライド。
- c) 1975年のHaicheng地震における、Shimenダムの上流側にある礫質砂のシェル部分での滑り。
地震終了直後に上流側で気泡が目撃され、80分後に滑りによる亀裂が現れた。
- d) 1974年のTangshan地震における、Baiheダムの上流側にある砂質礫の液状化による滑り。
- e) 1983年のMount Borah地震における、Whiskey Springs滑り。噴砂の最大粒径は、最大1インチであった。また、液状化したと予想される層の最大粒径は3インチであった。

1.2 フィルダムに用いられる材料の粒度、透水性

堤体材料の適正範囲として、図2が示されている²⁾。建設省所管のフィルダムで用いられている粒度分布の例を図3に示す³⁾。これらを図1と比較すると、透水性材料も条件によっては液状化する可能性があることが予想される。また、これらのデータをまとめると以下のようになる³⁾。

(1) 最大粒径

- ・透水性材料では100mm以上。
- ・半透水性材料では20～200mm程度。
- ・遮水材料では5～100mm程度。

(2) 細粒分 (74 μ m以下) 含有率

- ・透水性材料, 半透水性材料では数%以下。
- ・遮水材料では10～50%程度。

(3) 均等係数

- ・各材料共に10以上で粒度分布のよいものが多い。

(4) 透水係数

- ・透水性材料では 10^{-2} cm/sec以上。
- ・半透水性材料では $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/sec程度。
- ・遮水材料では 10^{-5} cm/sec以下。
- ・粗粒材の透水係数は、 D_{10} を用いたHazenの式により、概略推定できる⁴⁾。(図4、透水性材料の D_{10} が図3より1mm以上とすると、Hazenの式による透水係数は1 cm/sec以上となる。)

1.3 排水条件の影響

一般に、透水性材料は透水係数が十分に高いため、地震時でも非排水状態にはならないと考えられている。しかし、ロックフィルダムのように規模が大きい場合、また、転圧した際に透水性の低い層が水平方向に形成されるような場合には、過剰間隙水圧の消散が生じにくくなることが予想される。

(1) ロックフィルダムの排水条件

- 過剰間隙水圧の発生特性をモデル化して圧密方程式を解く⁵⁾。(水平方向1次元の消散)
 - ・高さ320feetのダムでは、透水材料の透水係数が25cm/secの場合には30~60%、75cm/secの場合には10~20%の過剰間隙水圧が残留した。(図5)
- 地震時応答解析と上記の計算を組み合わせる⁶⁾。(2次元の消散)
 - ・高さ100mのダムでは、透水材料の透水係数が1.0cm/secの場合には非排水条件とほとんど変わりがなく、10cm/secの場合には水圧消散の効果が顕著になり、100cm/secの場合にはほとんど残留間隙水圧が生じなかった。(図6)
- 多孔質弾性体の支配方程式より求める⁷⁾。
 - ・図7中の無次元量 π_1 が 10^{-2} 以下では非排水状態、 10^2 以上では排水状態と見なせる。高さ50mのダムで地震波の周期を0.5秒とすると、透水係数が 10^{-5} cm/sec以下の場合に非排水条件と見なせることになる。

(2) 部分排水条件での液状化特性

- 三軸供試体の排水経路に排水バルブを取付け、部分排水状態で繰返し三軸試験を行う⁶⁾⁸⁾。
 - ・繰返し応力比が大きく、少ない繰返し回数で液状化するような場合には、非排水条件での液状化強度とあまり変わらない。繰返し回数の多い場合に部分排水の効果が現れる。(図8、図9)
 - ・一定の部分排水条件下では、10回程度の繰返し応力が載荷される間に液状化が生じなければ、それ以上繰返し載荷を継続しても液状化しない。(図8)

b) (1)のa)と同じ方法で数値計算を行う⁶⁾。

・排水バルブの通水能を大きくするほど液状化強度が高くなる。特に、繰返し回数が大きい場合の強度の増加が著しい点が、実験結果と定性的に一致する。(図10)

1.4 メンブレンコンプライアンスの影響

粗粒材の供試体の表面は滑らかでないため、供試体の圧密時には、この部分にメンブレンの貫入(メンブレンペネトレーション⁹⁾)が生じる。過剰間隙水圧が発生すると、この貫入量が減少して部分排水と同じ効果が生じるため、貫入量に変化しない場合よりも過剰間隙水圧の発生量が小さくなる。(図11¹⁾)このような貫入量の変化により繰返し強度が過小評価されることをメンブレンコンプライアンスと呼んでいる。

(1) メンブレンコンプライアンスの評価

a) 貫入量の定量的評価

- ・供試体は等方除荷時に等方的な変形をすると仮定し、軸ひずみを3倍することにより真の体積ひずみを求める。ピュレットで測定した供試体の体積変化量との差を、貫入量とする¹⁰⁾。
- ・三軸供試体の中央に円筒型の真ちゅうを入れて、その大きさを変化させながら供試体の排水量を測定し、貫入量を外挿して求める¹¹⁾。(図12¹⁶⁾)
- ・中空供試体の内径を変えて、上記と同様の評価を行う¹²⁾。
- ・三軸供試体の半径方向のひずみを直接測定し、供試体の真の体積ひずみを求める¹³⁾。(図13)

b) メンブレンコンプライアンスの除去

- ・メンブレンの内側に液体ゴムを塗る¹⁴⁾。(図14)
- ・メンブレンの外側に充填材を塗る^{1) 15)}。(図15、16)
- ・供試体の間隙に砂を流し込み、圧密時のメンブレンの貫入量を小さくする¹⁾。(図17、18)
- ・それぞれの材料に対する有効拘束圧と貫入量の関係をあらかじめ評価しておく。試験時に発生した過剰間隙水圧に対応する貫入量の変化と等しい体積の水を供試体に送り込み、等体積せん断を行う^{16) 17)}。(図19、20)

(2) 液状化強度の補正

a) 試験後に補正する方法

- ・それぞれの材料に対する貫入量をa)で評価し、1次元除荷時の供試体骨格の初期接線弾性係数 E_r と、単位体積の貫入に要する圧力変化量 K_c の比として定義したシステムコンプライアンス比 C_R を求める。いくつかの仮定のもとに計算して導いた C_R と液状化強度の関係をを用いて、メンブレンコンプライアンスのある状態で求めた液状化強度の補正を行う¹⁸⁾。(図21)

- ・メンブレンコンプライアンスのある状態で行った繰返し三軸試験における過剰間隙水圧の上昇過程での振幅から C_R を求め、同様の補正を行う¹⁹⁾。(図22)
- ・材料の平均粒径と供試体の大きさから概略の C_R を求め、補正を行う¹⁸⁾。(図23¹⁾)
 - b) 試験中に補正する方法
- ・(1)のb)のいずれかの方法で行う。

1.5 粗粒材の液状化試験の例

試験装置が大規模になるため、研究例は少ない。

(1) メンブレンコンプライアンスのある試験

- a) Leeら²⁰⁾、Wongら²¹⁾ (図24¹⁸⁾)
 - ・供試体寸法は、前者は $\phi 70\text{mm}$ 、後者は $\phi 300\text{mm}$ 。材料の最大粒径は、前者は 20mm 、後者は 50mm 。
 - ・メンブレンコンプライアンスの補正を行うと、平均粒径が大きくなっても、液状化強度は増加しない¹⁸⁾。
- b) Banerjeeら¹³⁾ (図25)
 - ・供試体寸法は $\phi 300\text{mm}$ 。材料の最大粒径は 50mm 。既存のダムの耐震性を検討するための試験。
 - ・別途測定したシステムコンプライアンスを考慮し、液状化強度を10%低減して計算に用いた。
 - ・拘束圧の影響、異方圧密の影響も合わせて検討した。
- c) 佐々木ら⁴⁾ (図26)
 - ・供試体寸法は $\phi 358\text{mm}$ 。材料の最大粒径は 50.8mm 。
 - ・液状化強度は材料により異なる。砂よりも小さい液状化強度を示す場合もある。
- d) 松本ら²²⁾ (図27)
 - ・供試体寸法は $\phi 300\text{mm}$ 。材料の最大粒径は 63.5mm 。

(2) メンブレンコンプライアンスを除去あるいは少なくした試験

- a) Evansら¹⁾ (図18、23)
 - ・供試体寸法は $\phi 300\text{mm}$ 。材料の最大粒径は 50mm 。
- b) 手代木¹⁵⁾ (図16)
 - ・供試体は、外形 250mm 、内径 150mm 、高さ 142mm の中空供試体。材料の最大粒径は 9.5mm 。

2. 粗粒材が液状化した場合、どのような特性を示すか？

(主に砂についての既往の結果を利用する)

2.1 密度の違いによる影響 (ゆる詰め: $D_r \approx 50\%$ 、密詰め: $D_r \approx 80\%$)

ゆるい砂と密な砂の繰返しせん断時の挙動は、以下に示すようにかなり異なっている。フィルダムで用いられる高密度に締固められた粗粒材は、密な砂と同様の挙動を示すことが予想される。

(1) せん断ひずみの特性 (载荷回数に対する変化)

- ・ゆる詰めの場合、ひずみがある時点から急増する。(図28)
- ・密詰めの場合、ひずみは緩やかに増加し、ある値以上は増加し難い。(図29)

(2) 間隙水圧の特性 (载荷回数に対する変化)

- ・ゆる詰め、密詰めの場合、共に間隙水圧比が50%位までは、滑らかに(振幅を持たずに)上昇するが(ひずみ振幅が微小)、その後は、正のダイラタンシーの効果により振幅をもちつつ上昇し、後はほぼ一定の挙動を示す。(図28、29)

(3) 応力・ひずみ関係の特性 (図30、31)

- ・ゆる詰め、密詰めの場合とも、せん断応力がゼロを交差するときに、ひずみが大きく変化する。
- ・ゆる詰め、密詰めの場合とも、せん断応力が増加すると剛性が増す。これは、先に見た間隙水圧が減少することによる。

(4) 有効応力経路の特性 (図32、33)

- ・間隙水圧の変化特性はある時点から変化する。
- ・間隙水圧が一定限度以上増加すると、有効応力経路は原点を通るようになり、その後、せん断応力が増加するときには、破壊線上を上昇する。

(5) 液状化強度²³⁾

- ・所定の繰返し回数で所定のせん断ひずみ(両振幅3~15%)を生じる応力比は、緩い砂ではせん断ひずみの大きさによらないが、密な砂ではせん断ひずみの大きさにより異なる。(図34、35)
- ・所定の繰返し回数で大きなせん断ひずみ(両振幅15%)を生じる応力比を液状化強度とすると、液状化強度はある密度以上になると急激に増大し、静的排水強度に近づく。(図36)

(6) 締固め度と相対密度

・フィルダム材料の密度は、次式による締固め度Dとして表される場合が多い。

$$D = \rho_d / \rho_{dmax} \quad \text{ここに、} \rho_d : \text{乾燥密度、} \rho_{dmax} : \text{最大乾燥密度}$$

一方、砂の密度は次式による相対密度Drを用いて表す場合が多い。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} * 100 = \frac{\rho_{dmax} (\rho_d - \rho_{dmin})}{\rho_d (\rho_{dmax} - \rho_{dmin})} * 100 \quad (\%)$$

ここに、e : 間隙比、e_{max} : 最大間隙比、e_{min} : 最小間隙比、ρ_{dmin} : 最小乾燥密度

Dで用いるρ_{dmax}は、湿润状態の締固め試験より求められる。一方、Drで用いるρ_{dmax}, ρ_{dmin}は、砂の場合は乾燥状態で求められ、粒径の大きい材料や細粒分の多い材料に対しては標準的な試験法が確立していない。

・最大粒径2インチのロック材料について、ASTM D-2049の方法により求めたρ_{dmax}, ρ_{dmin}¹³⁾によるDとDrの関係を図37-Aに示す。Dが0.01変化すると、Drは10%程度変化する。

・アースダム材料について、Dを2通りに変えて液状化試験を行った結果を図37-Bに示す。Dが0.9の場合よりも1.0の場合のほうが液状化強度が2倍近く大きくなっている。

2.2 初期せん断応力による影響

フィルダムの各部には、ダムの形状・水位等に応じた初期せん断応力が作用している。(図37-C¹³⁾) この場合の動的強度・変形特性は、通常の繰返し三軸試験で行われる等方状態での挙動とは異なる点がある。

以下では、初期せん断応力の方向と動的繰返し応力の方向が一致している場合を対象に行った実験結果(D_r ≒ 50%)について述べる。この場合には、初期せん断応力と動的せん断応力の大小関係によって、結果が大きく異なる。

(1) せん断ひずみの特性 (载荷回数に対する変化)

- ・せん断ひずみは、初期せん断応力の作用する方向に増加する。
- ・動的せん断応力が初期せん断応力よりも大きく、せん断応力方向の反転がある場合には、せん断ひずみ振幅が徐々に大きくなる。(図38)
- ・動的せん断応力が初期せん断応力よりも小さく、せん断応力方向の反転がない場合には、せん断ひずみはかなりの大きさまでほとんど振幅を示さずに増加する。(図39)

(2) 間隙水圧の特性

- ・せん断応力方向の反転がある場合には、せん断応力がゼロを交差するときに過剰間隙水圧が極大値をとる。(図38)

- ・せん断応力方向の反転がない場合には、せん断応力が最小となる時に過剰間隙水圧が極大値をとる。(図39)

(3) 応力・ひずみ関係の特性

- ・せん断応力方向の反転がある場合には、せん断応力がゼロを交差するときに、せん断ひずみが大きく変化する。せん断ひずみは両方向に生じる。(図40)
- ・せん断応力方向の反転がない場合には、せん断ひずみは初期せん断応力の作用する方向のみに生じる。(図41)

(4) 有効応力経路の特性

- ・有効応力経路は、非対称な変化を示す(図42、43)
- ・せん断応力方向の反転がある場合には、有効応力経路は載荷とともに原点を通るようになり、それ以降は破壊線上を上昇する。(図42)
- ・せん断応力方向の反転がない場合には、有効応力経路は原点を通らない。(図43)

(5) 液状化強度

- ・所定の繰返し回数で所定のせん断ひずみ(片振幅2.5~7.5%)が生じる繰返しせん断応力比を液状化強度とすると、初期せん断応力比の大きいほうが全般的には液状化強度が大きい。ただし、ゆるい砂では初期せん断応力比の小さいときの液状化強度が最小となる場合もある。(図44²⁴⁾)
- ・既存のダムを対象に、初期せん断応力をいくつか変えた液状化試験結果(図45)を用いて、初期せん断応力(図37)を考慮した地震時変形特性の評価(図46)を行った例がある¹³⁾。
- ・等方状態での液状化強度がわかっている場合に、初期せん断応力の影響を考慮する方法として、図47のような補正係数を用いることが提案されている²⁵⁾。

2.3 拘束圧の違いによる影響

規模が大きいフィルダムでは、表層部と深部の拘束圧がかなり異なる。深部の液状化強度が問題となる場合には、拘束圧の違いを考慮する必要がある。

(1) 静的排水強度

- ・粗粒材の静的排水試験結果によれば、拘束圧が大きくなるほど破壊時の体積ひずみが収縮側に大きくなり、負のダイラタンシーが強まる。(図48²⁶⁾、図49²⁷⁾)これは、粒子破砕量が大きくなることに関係すると考えられている。

(2) 液状化強度

- ・既存のダム材料を用いた要素試験結果（図45）では、拘束圧が大きくなるほど拘束圧で正規化した動的強度が低下する¹³⁾。
- ・通常の試験が行われている拘束圧レベルでの液状化強度がわかっている場合に、拘束圧の違いによる影響を考慮する方法として、図50のような補正係数を用いることが提案されている²⁵⁾。

2.4 圧密時間の影響

既存のダムの耐震性を評価する場合には、長期圧密による強度増加を考慮することができる。

- ・2種類の砂に対して、圧密時間を変えて非排水繰返し三軸試験を行ったところ、1630時間（約10週間）の圧密後の液状化強度は、1時間の圧密後よりも20～30%程度大きく、細粒分の多い砂のほうが強度が増加しやすかった²⁸⁾。（図51）
- ・既存のダム材料を用いた要素試験では、10週間の圧密による液状化強度の増加は10%以上であった¹³⁾。（図52）この場合には、長期圧密時にメンブレンが塑性変形することによるメンブレンコンプライアンスの変化の影響を、本来は考慮する必要がある。

2.5 過圧密比の影響

表層部では、転圧により見かけ上過圧密になっている可能性がある。

- ・2種類の砂に対して、過圧密比を変えて非排水繰返し三軸試験を行ったところ、1630時間（約10週間）の圧密後の液状化強度は、1時間の圧密後よりも20～30%程度大きく、細粒分の多い砂のほうが強度が増加しやすかった²⁸⁾。（図53）

3. 粗粒材の液状化強度をどのように予測するか？

3.1 原位置貫入試験

砂地盤の液状化強度の概略判定に、標準貫入試験結果が従来より用いられてきている。砂礫地盤に対しても、先端改良した標準貫入試験と大型貫入試験の適用性の検討が進められている²⁹⁾。

3.2 凍結サンプリング

乱れの少ない不攪乱試料を砂地盤から採取する方法として開発された凍結サンプリング法が、砂礫地盤にも適用されている³⁰⁾。

3.3 相似粒度の攪乱試料

相似粒度に調整した材料を用いた静的排水試験は従来より行われており、相似粒度の適用性に

関する検討も行われている²⁶⁾。液状化強度に関する研究例はないが、メンブレンコンプライアンスを除去した試験を数多く行うことが可能になれば、相似粒度の適用性を調べることができる。

3.4 静的排水試験結果からの推定

砂に用いた静的排水試験結果において、最大収縮点（図54）での体積ひずみと軸差応力、拘束圧から計算される指数が、液状化強度との間に相関性があることが示されている^{31) 32)}。（図55）この関係が粗粒材にも成立すれば、静的排水試験結果から液状化強度を推定できる可能性がある。

4. まとめ

- ・フィルダムの規模と材料の透水性によっては、地震時の過剰間隙水圧の消散が十分に期待できない場合がある。
- ・メンブレンコンプライアンスを補正すると、粗粒材の液状化強度は砂と同程度になる。
- ・フィルダムの液状化時の特性として、高密度に締固められていること、及び初期せん断応力が作用していることの影響を考慮する必要がある。
- ・粗粒材の液状化強度を予測する方法として、いくつかの手法の検討が進められている。

参考文献

- 1) Evans, M.D. and Seed, H.B. (1987) "Undrained Cyclic Triaxial Testing of Gravels - the Effect of Membrane Compliance", EERC, U.C. Berkeley, Report No. UCB/EERC-87/08.
- 2) 土質工学会(1983) "現場技術者のための土と基礎シリーズ7 フィルダムの調査・設計から施工まで", p.67.
- 3) 建設省河川局開発課、建設省土木研究所(1976) "フィルダムの設計と施工に関する研究", 第30回建設省技術研究会報告、pp.547~578.
- 4) 佐々木ら(1981) "河床レキ層の耐震安定性に関する調査報告", 土木研究所資料第1669号.
- 5) Sadigh, K. et al. (1978) "Drainage Effects on Seismic Stability of Rockfill Dams", Proc. of ASCE, Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp.802~818.
- 6) 松尾ら(1989) "フィルダム材料の動的強度に関する実験報告書", 土木研究所資料第2755号.
- 7) Zienkiewicz, O.C. et al. (1980) "Drained, Undrained, Consolidating and Dynamic Behavior Assumptions in Soils", Geotechnique, Vol.30, No.4, pp.385~395.
- 8) 梅原ら(1981) "排水効果を考慮した飽和砂の液状化強度", 港湾技術研究所報告第20巻、第1号、pp.3~33.
- 9) Newland, P.L. and Allely, B.H. (1959) "Volume Changes during Undrained Triaxial Tests on Saturated Dilatant Granular Materials", Geotechnique, Vol.9, No.4, pp.174~182.
- 10) Vaid, Y.P. and Nagussey, D. (1984) "A Critical Assessment of Membrane Penetration in the Triaxial Testing", Geotechnical Testing Journal, Vol.7, No.2, pp.70~76.
- 11) Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A. (1963) "An Evaluation of Test Data for Selecting a Yield Criterion for Soils", ASTM, STP361, pp.111~128.
- 12) Frydman, S., Zeitlen, J.G. and Alpan, I. (1973) "The Membrane Effect in Triaxial Testing of Granular Soils", Jour. of Testing and Evaluation, Vol.1, NO.1, pp.37~41.
- 13) Banerjee, N.G., Seed, H.B. and Chan, C.K. (1979) "Cyclic Behavior of Dense Course-grained Materials in Relation to the Seismic Stability of Dams", EERC, U.C. Berkeley, Report No. UCB/EERC-79/13.
- 14) Kiekbusch, M. and Schuppener, B. (1977) "Membrane Penetration and Its Effect on Pore Pressure", ASCE, Vol.103, GT11, pp.1267~1279.
- 15) 手代木学 (1986) "中型中空ねじり三軸試験装置による砂礫土のせん断特性", 東京大学修士論文.
- 16) Ramana, K.V. and Raju, V.S. (1981) "Constant-volume Triaxial Tests to Study the Effects of Membrane Penetration", Geotechnical Testing Journal, Vol.4, No.3, pp.117~

122.

- 17) Tokimatsu, K. and Nakamura, K. (1986) "A Liquefaction Test without Membrane Penetration Effects", Soils and Foundations, Vol.26, No.4, pp.127~138.
- 18) Martin, G. R., Finn, W. D. L. and Seed, H. B. (1978) "Effects of System Compliance on Liquefaction Tests", ASCE, Vol.104, GT4, pp.463~479.
- 19) Tokimatsu, K. (1990) "System Compliance Correction from Pore Pressure Response in Undrained Cyclic Triaxial Tests", Soils and Foundations, Vol.30, No.2, pp.14~22.
- 20) Lee, K. L. and Fitton, J. A. (1969) "Factors Affecting the Cyclic Loading Strength of Soil", ASTM, STP450, pp.71~95.
- 21) Wong, R. T., Seed, H. B. and Chan, C. K. (1975) "Cyclic Loading Liquefaction of Gravelly Soils", ASCE, Vol.101, GT6, pp.571~583.
- 22) 松本ら (1987) "細砂と礫材との動的せん断強度の比較", 日米天然会議耐風耐震構造専門部会第19回合同部会.
- 23) Tatsuoka, F., Muramatsu, M. and Sasaki, T. (1982) "Cyclic Undrained Stress-strain Behavior of Dense Sands by Torsional Simple Shear Test", Soils and Foundations, Vol.22, No.2, pp.55~70.
- 24) 関ら (1989) "初期せん断力を受けた飽和砂の動的強度特性", 第24回土質工学研究発表会、pp.795~796.
- 25) Seed, H. B. (1983) "Earthquake-resistant Design of Earth Dams", ASCE, Seismic Design of Embankments and Caverns, pp.41~64.
- 26) Marachi, N. D., Chan, C. K. and Seed, H. B. (1972) "Evaluation of Properties of Rockfill Materials", ASCE, Vol.98, SMI, pp.95~112.
- 27) 土質工学会 (1982) "ロックフィル材料の試験と設計強度", p.203.
- 28) 木村ら (1986) "長期圧密及び過圧密された2種類の砂の三軸液状化強度", 第21回土質工学会、pp.591~594.
- 29) 岡本ら (1990) "砂礫地盤における貫入試験結果の信頼性に関する考察", 第25回土質工学会、pp.137~138.
- 30) 片岡ら (1989) "砂礫地盤の凍結サンプリング法の開発と適用性", 電力中央研究所・研究報告: U88073.
- 31) 今井ら (1975) "砂の圧縮性と液状化強度の関係", 第10回土質工学研究発表会、pp.333~336.
- 32) 梅原ら (1978) "飽和砂の液状化強さと静的性質の相関性", 第13回土質工学研究発表会、pp.529~532.

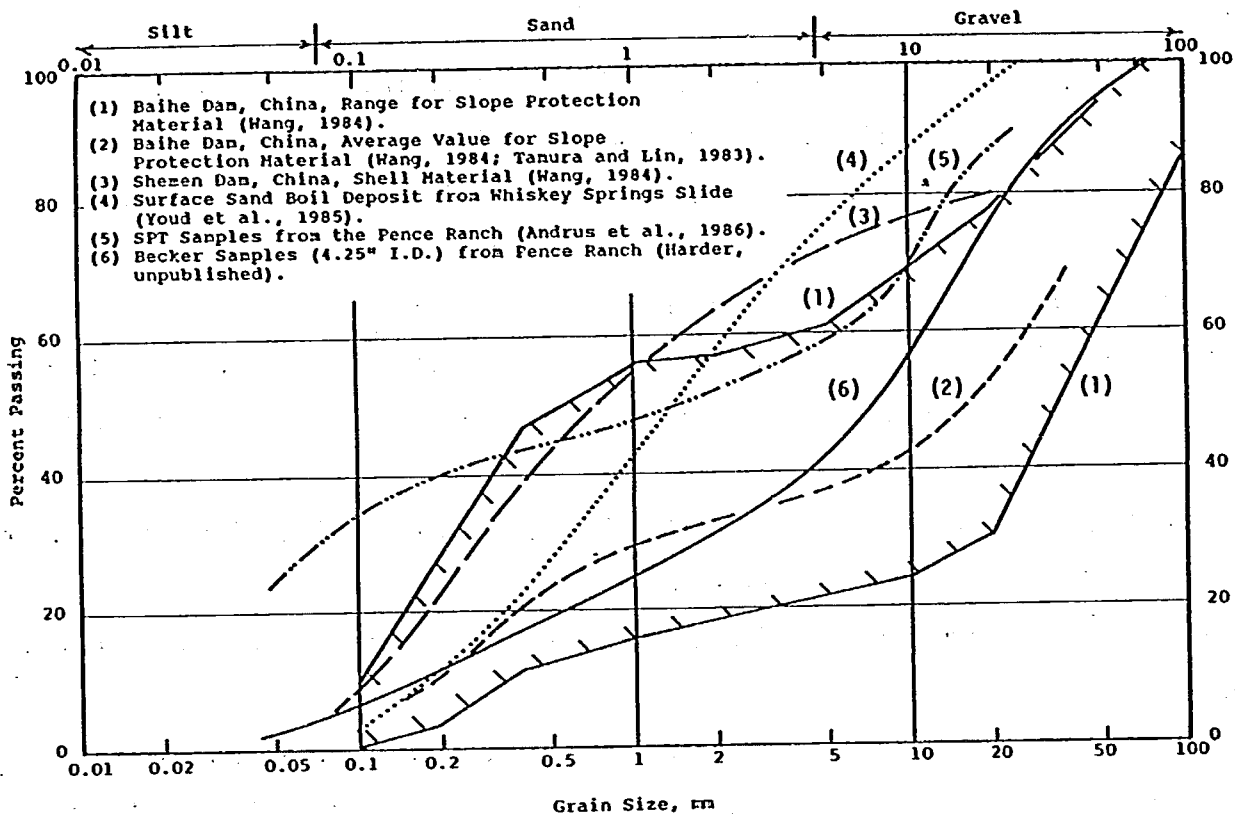


図1 液状化した粗粒材の粒度分布¹⁾

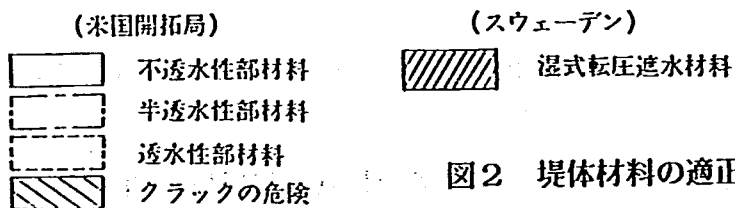
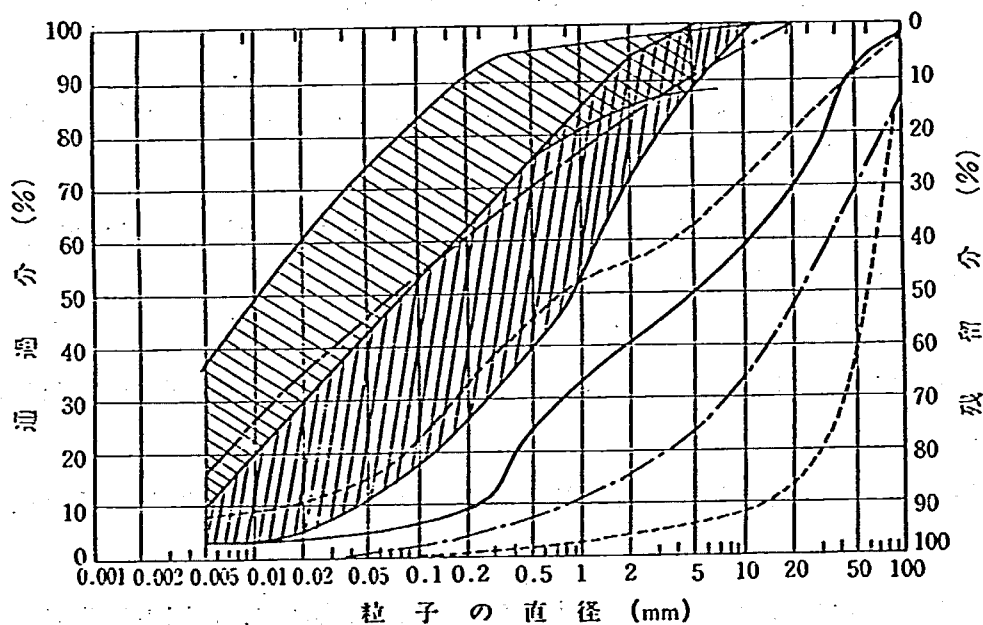


図2 堤体材料の適正範囲²⁾

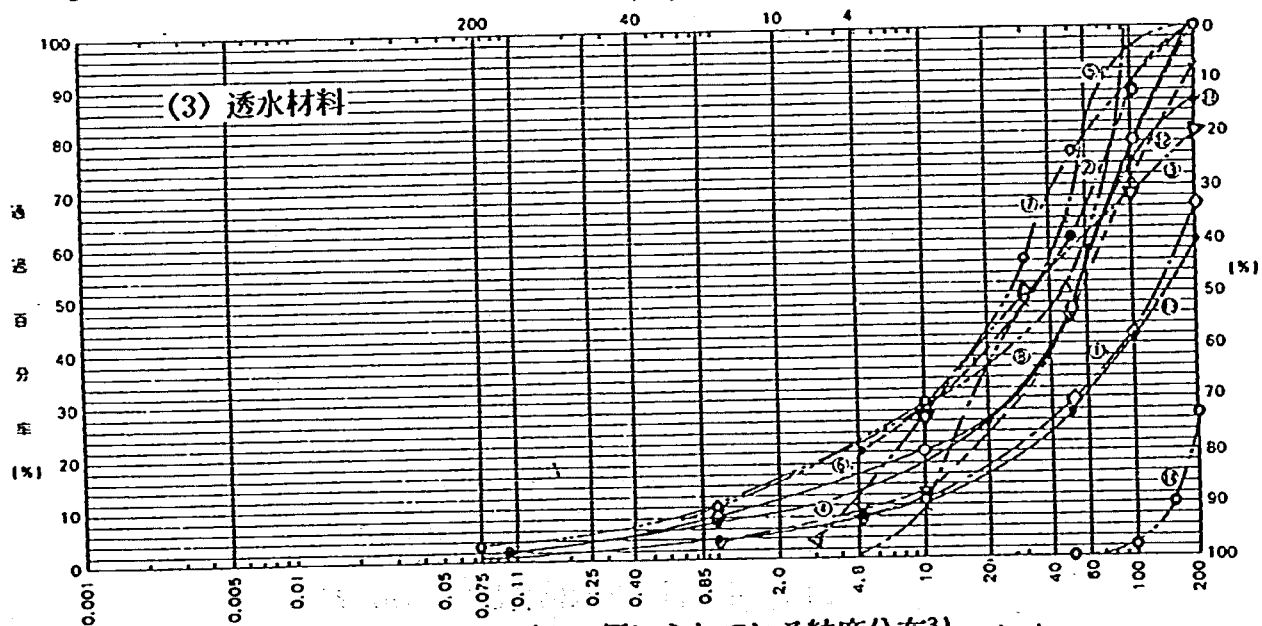
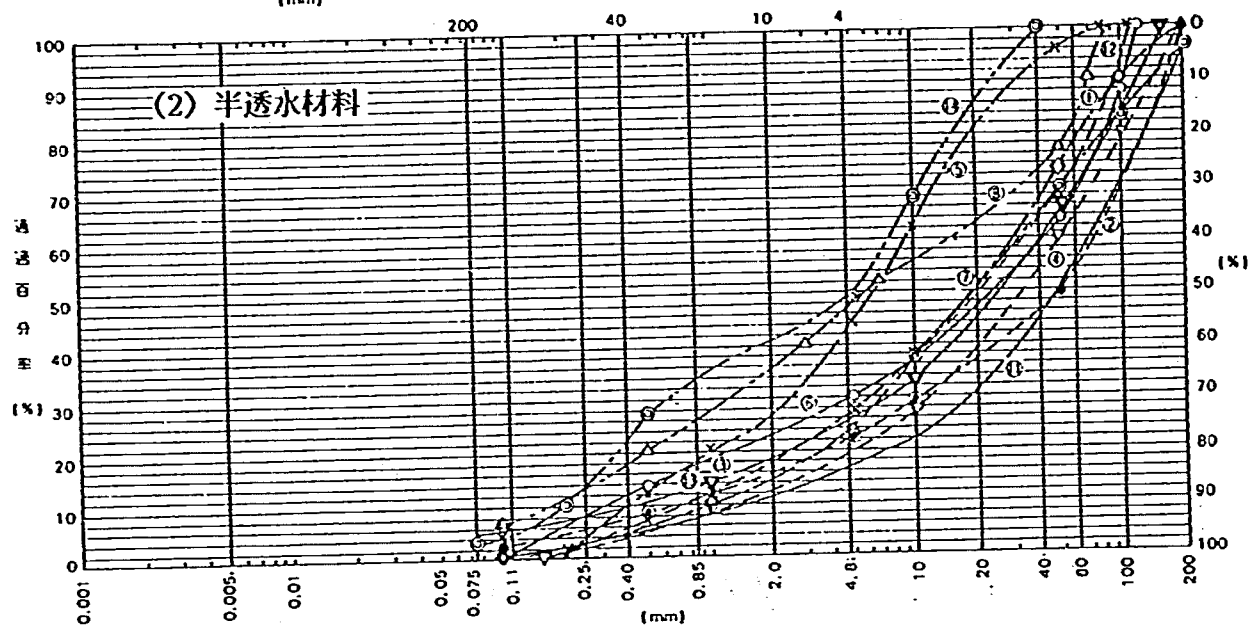
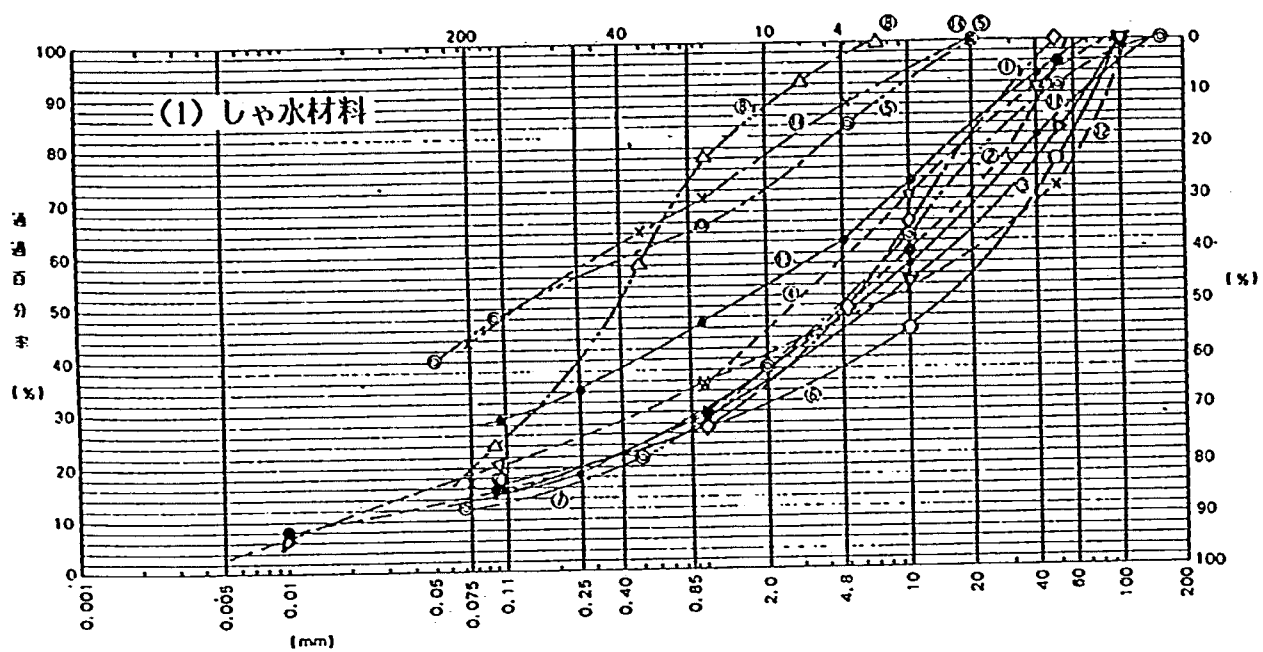


図3 建設省所管のフィルダムで用いられている粒度分布³⁾

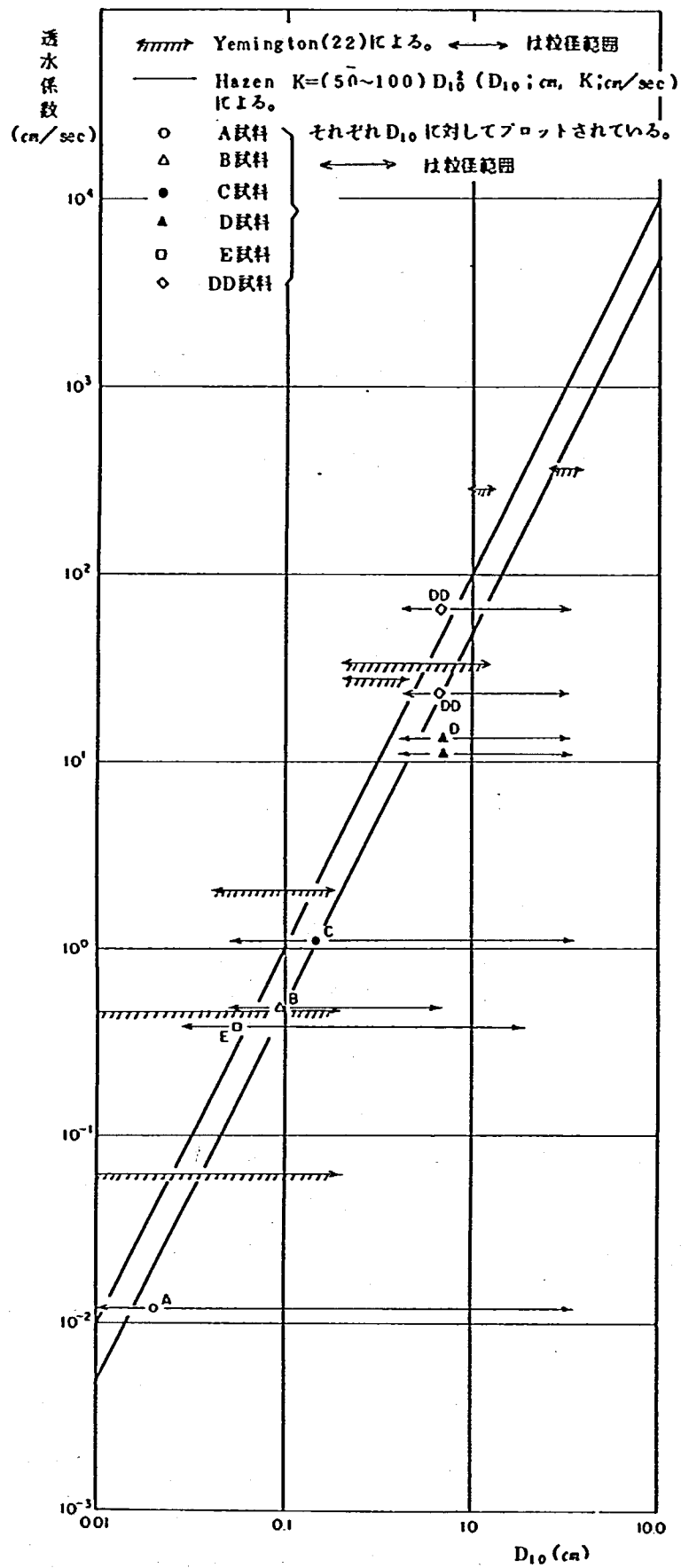
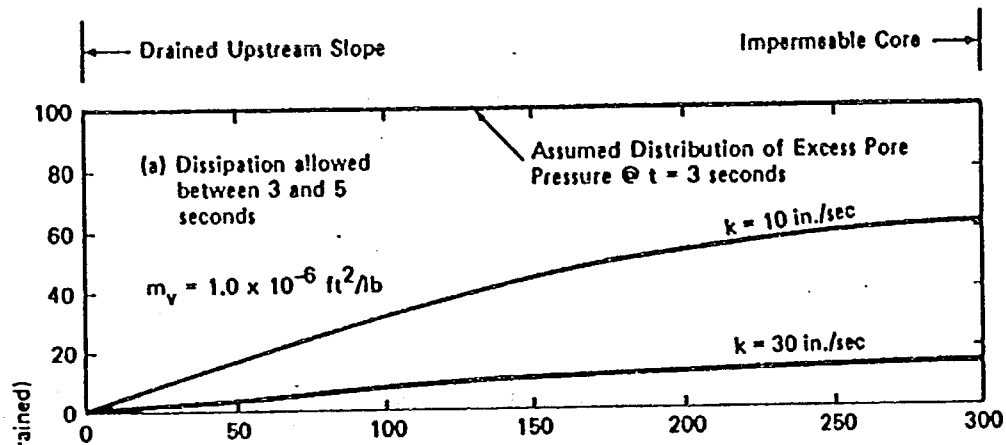
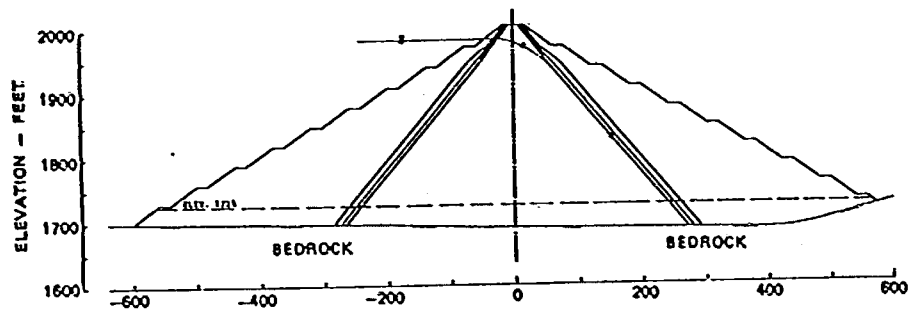
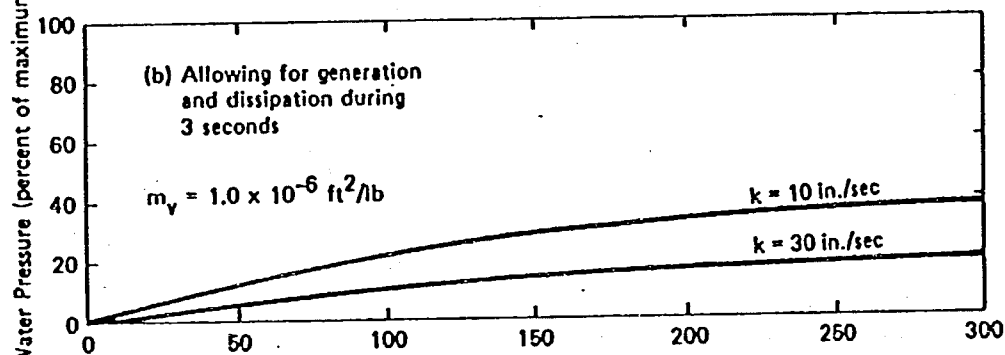


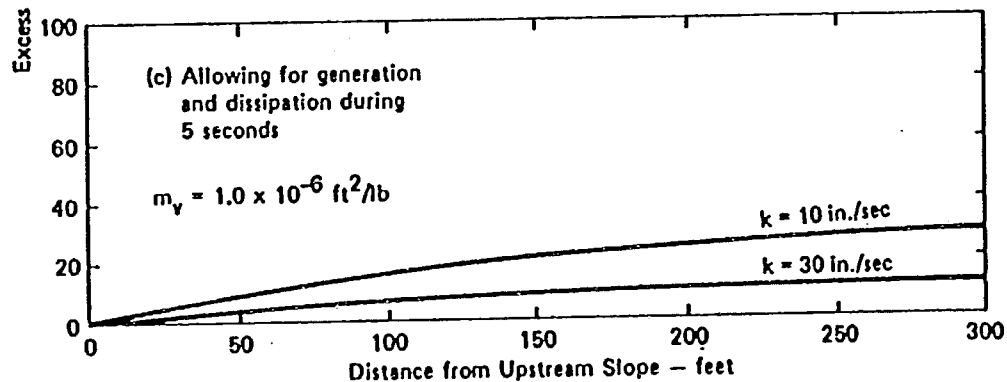
図4 粗粒材の透水係数と D_{10} の関係⁴⁾



(1) 地震開始後3~5秒の間に消散した場合



(2) 地震開始後0~3秒の間に消散した場合



(3) 地震開始後0~5秒の間に消散した場合

図5 計算された過剰間隙水圧分布⁵⁾

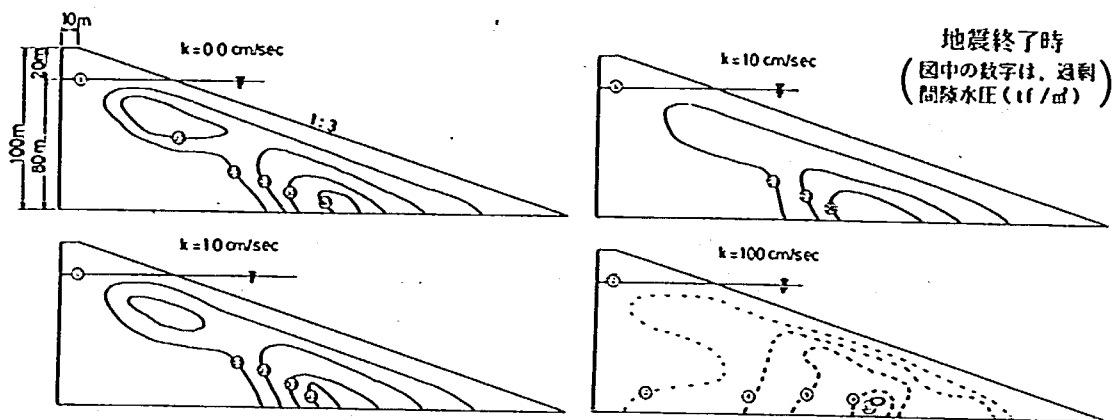


図6 計算された過剰間隙水圧分布⁶⁾ $M_v = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s} + 5$

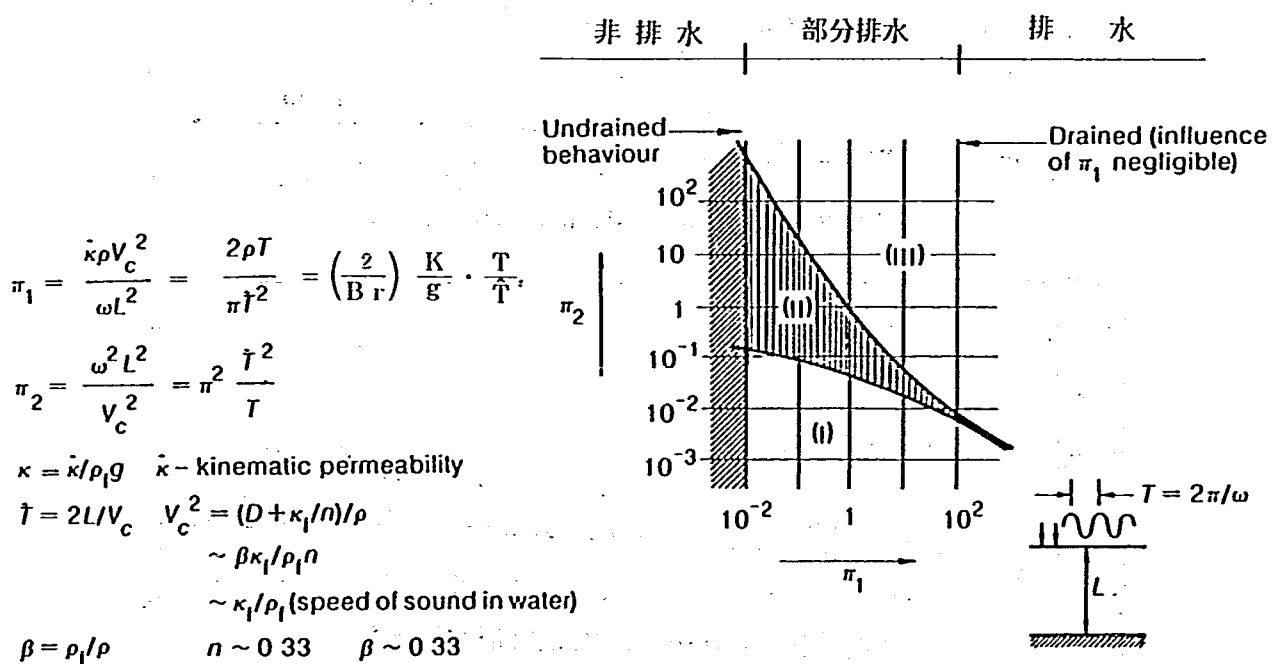


図7 無次元量 π_1 と排水・非排水条件⁷⁾

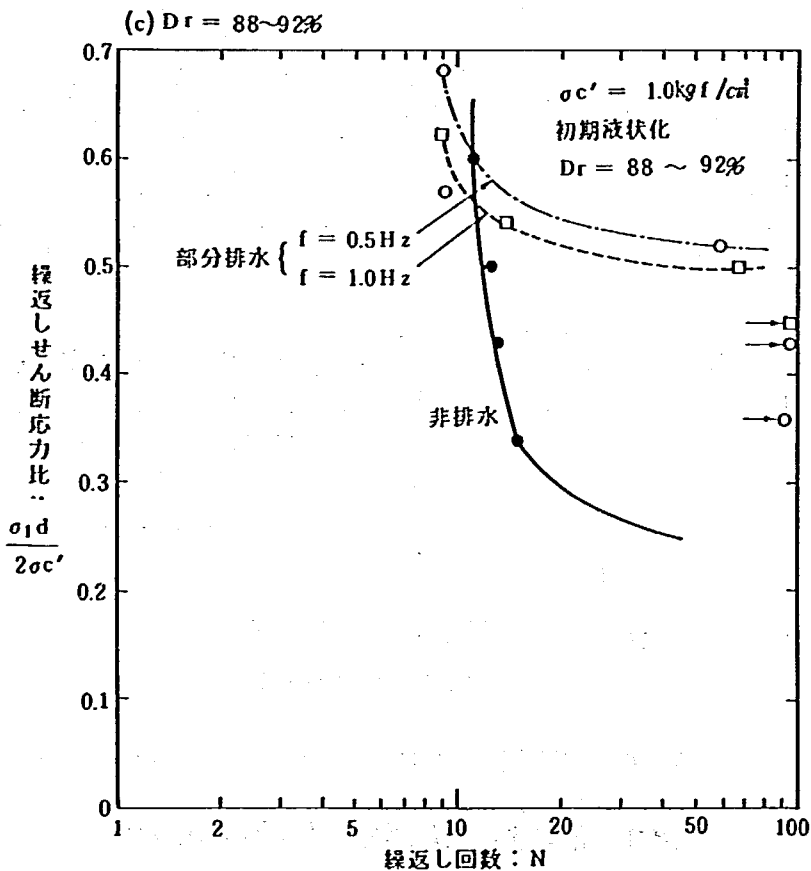
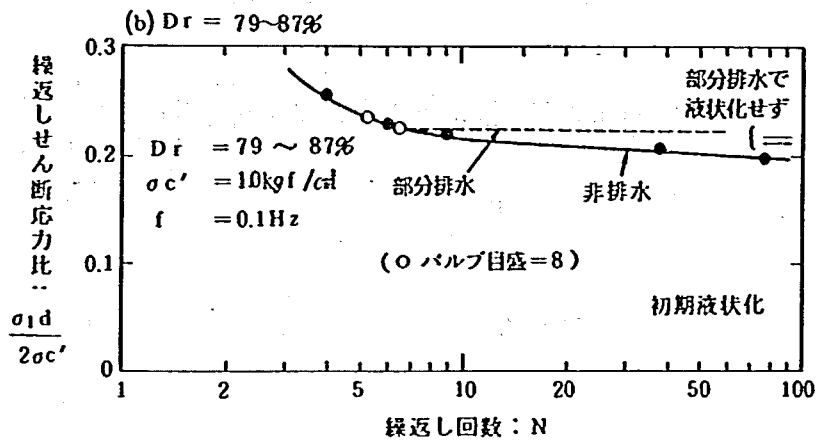
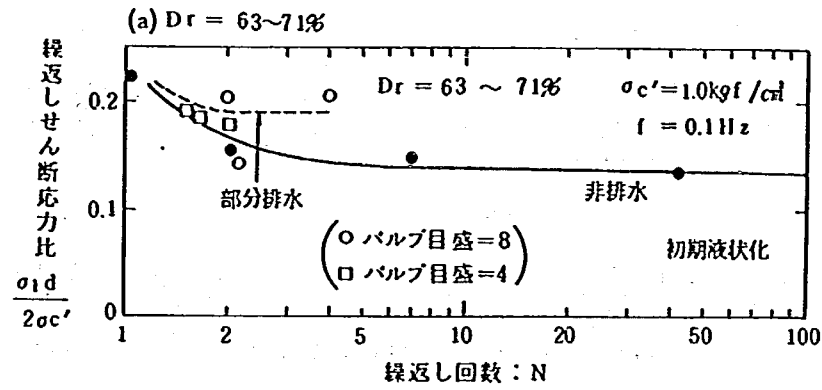
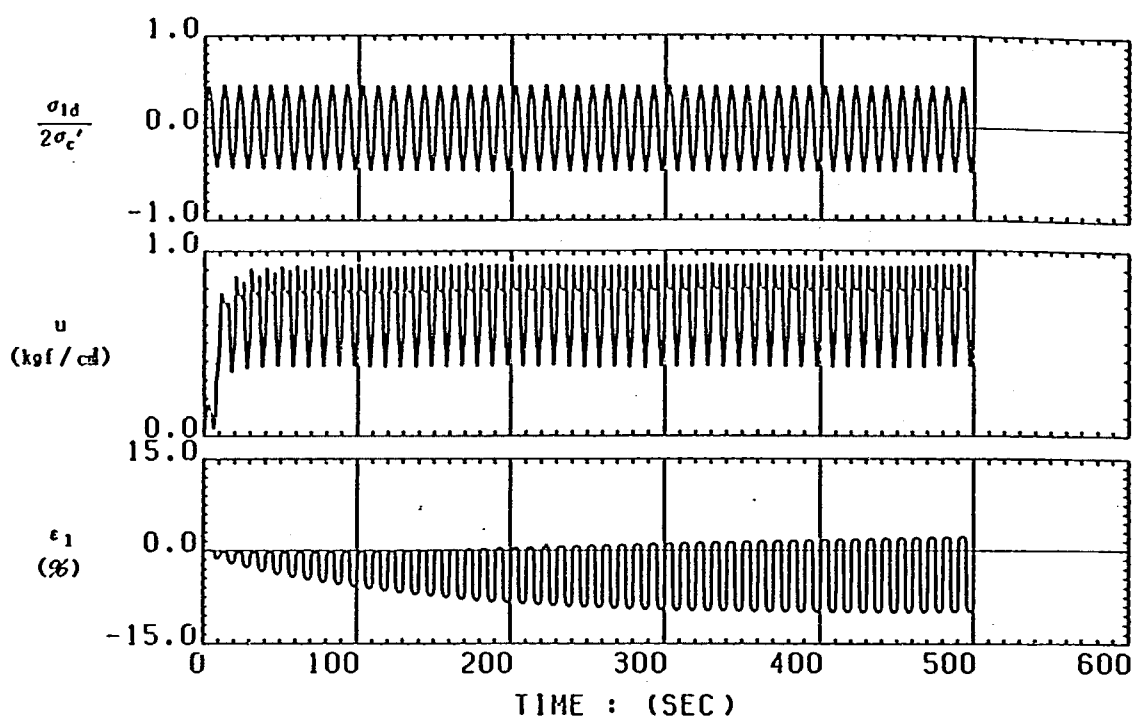
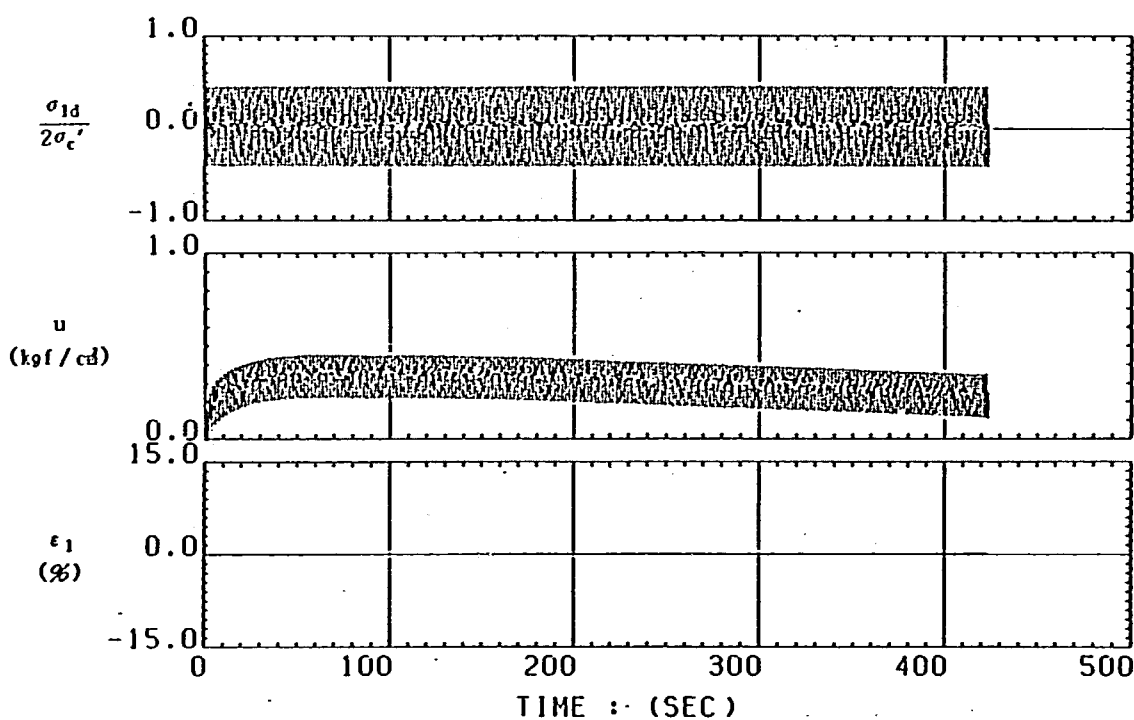


図8 部分排水条件での液状化強度 (試験結果) ⁶⁾



(a) 非排水 (供試体番号 : CU3, $D_r = 88\%$, $\sigma_{1d}/2\sigma_c' = 0.43$)



(b) 部分排水 (供試体番号 : CD4, $D_r = 89\%$, $\sigma_{1d}/2\sigma_c' = 0.43$)

図9 非排水試験と部分排水試験の比較⁶⁾

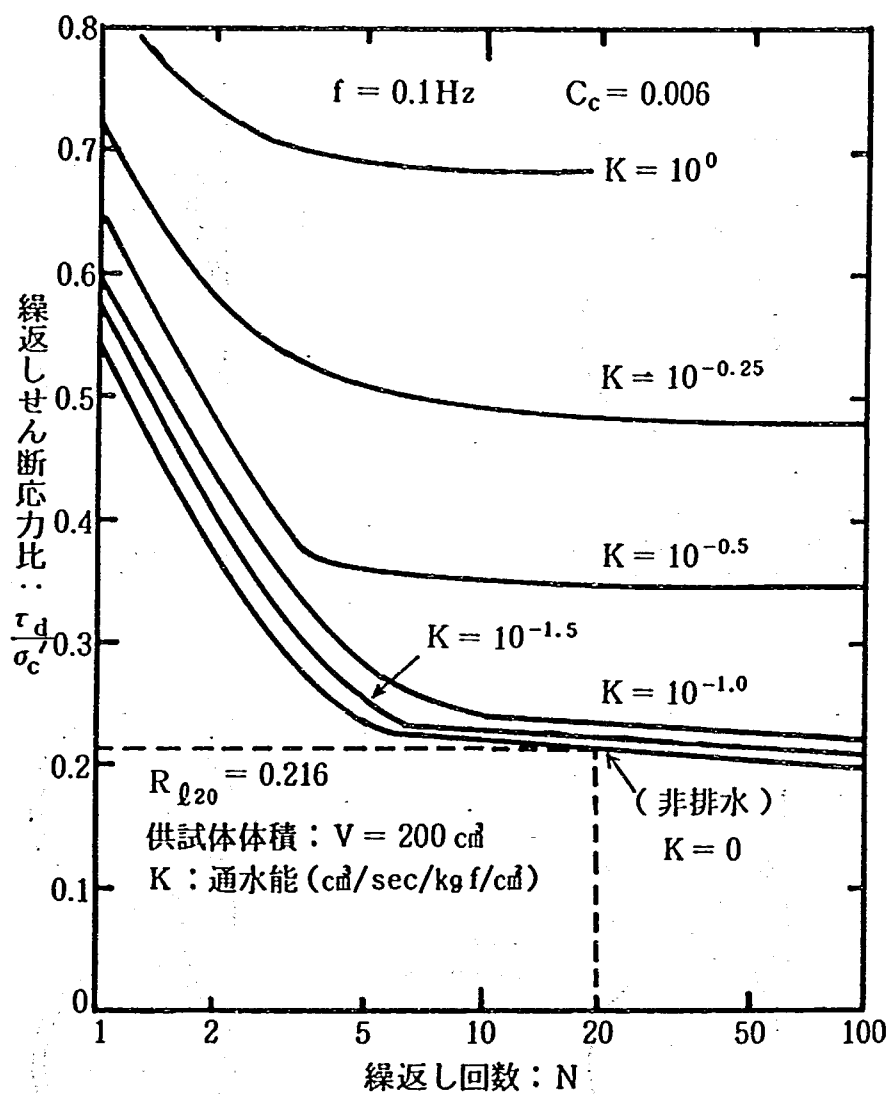
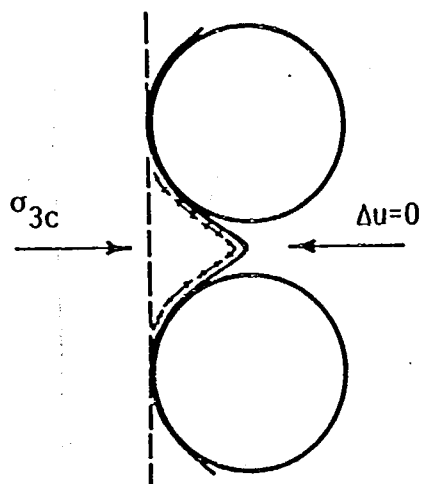
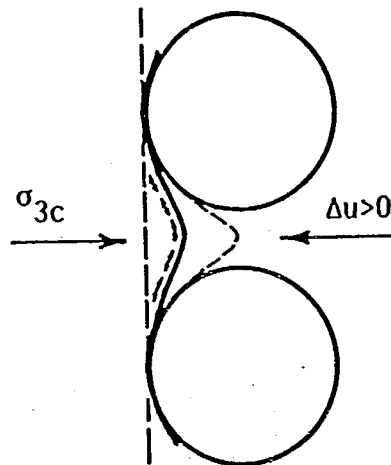


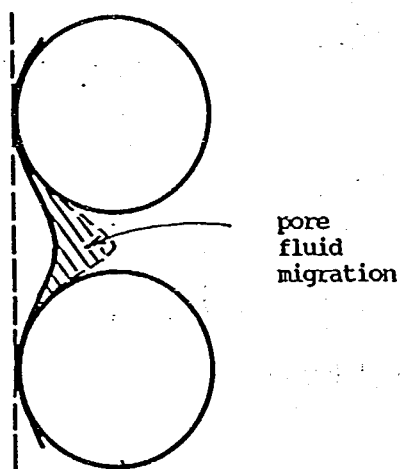
図10 部分排水条件での液状化強度（計算結果）⁶⁾



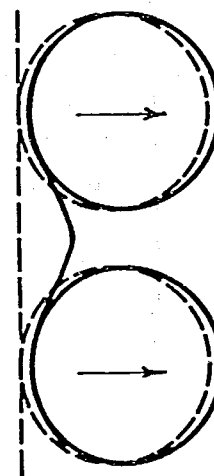
(a) Stress condition just before cyclic loading - tensile stresses are stored in the membrane



(b) Excess pore pressure development as a result of cyclic loading - σ_3' is reduced and stored stresses are released as membrane rebounds.



(c) Pore fluid is drawn to membrane penetration site as membrane rebounds, causing partial drainage of the interior voids



(d) Pore fluid redistribution from interior to peripheral voids causes consolidation of the grain structure to balance migration of fluid mass.

図11 メンブレンコンプライアンスの模式図¹⁾

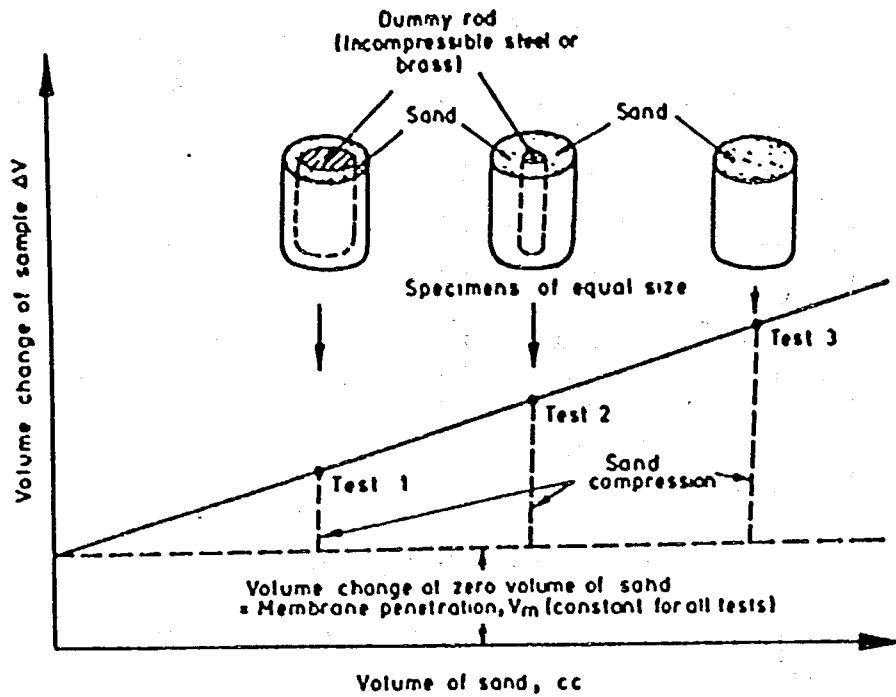


図12 三軸供試体の中央に円筒形の真ちゅうを入れる方法¹⁶⁾

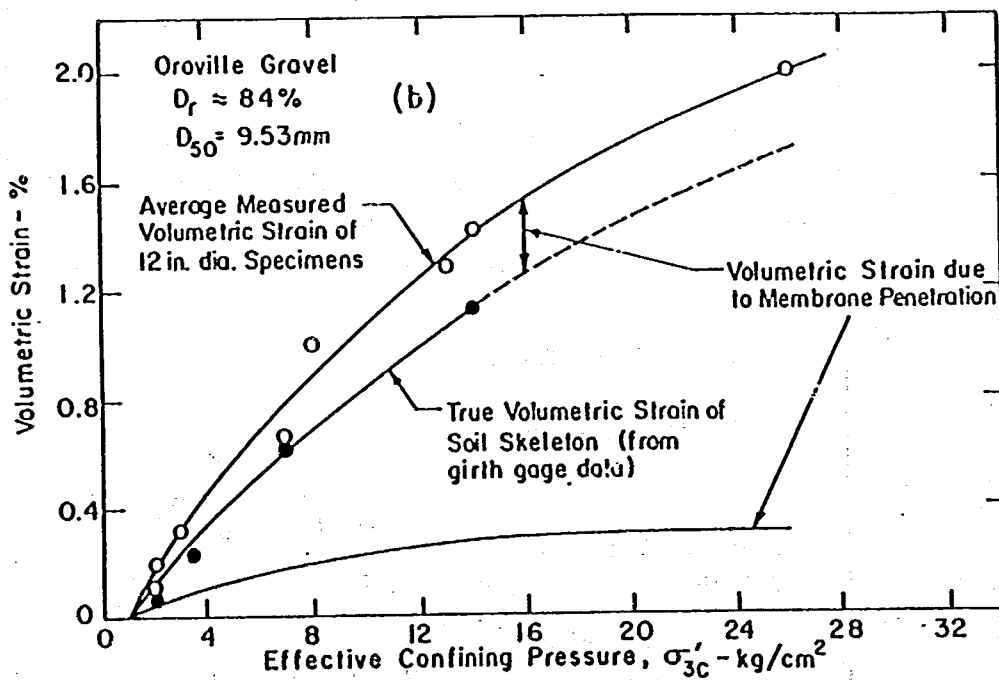


図13 三軸供試体の半径方向のひずみを直接測定する方法¹³⁾

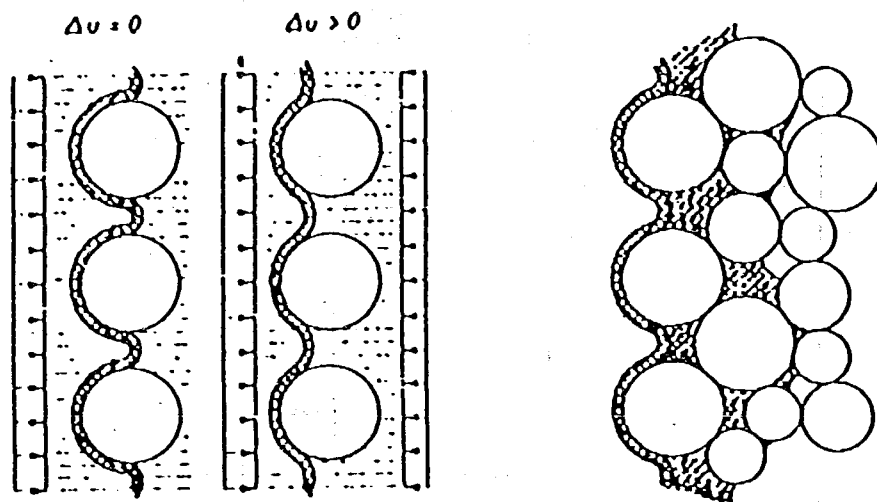


図14 メンブレンの内側に液体ゴムを塗る方法¹⁴⁾

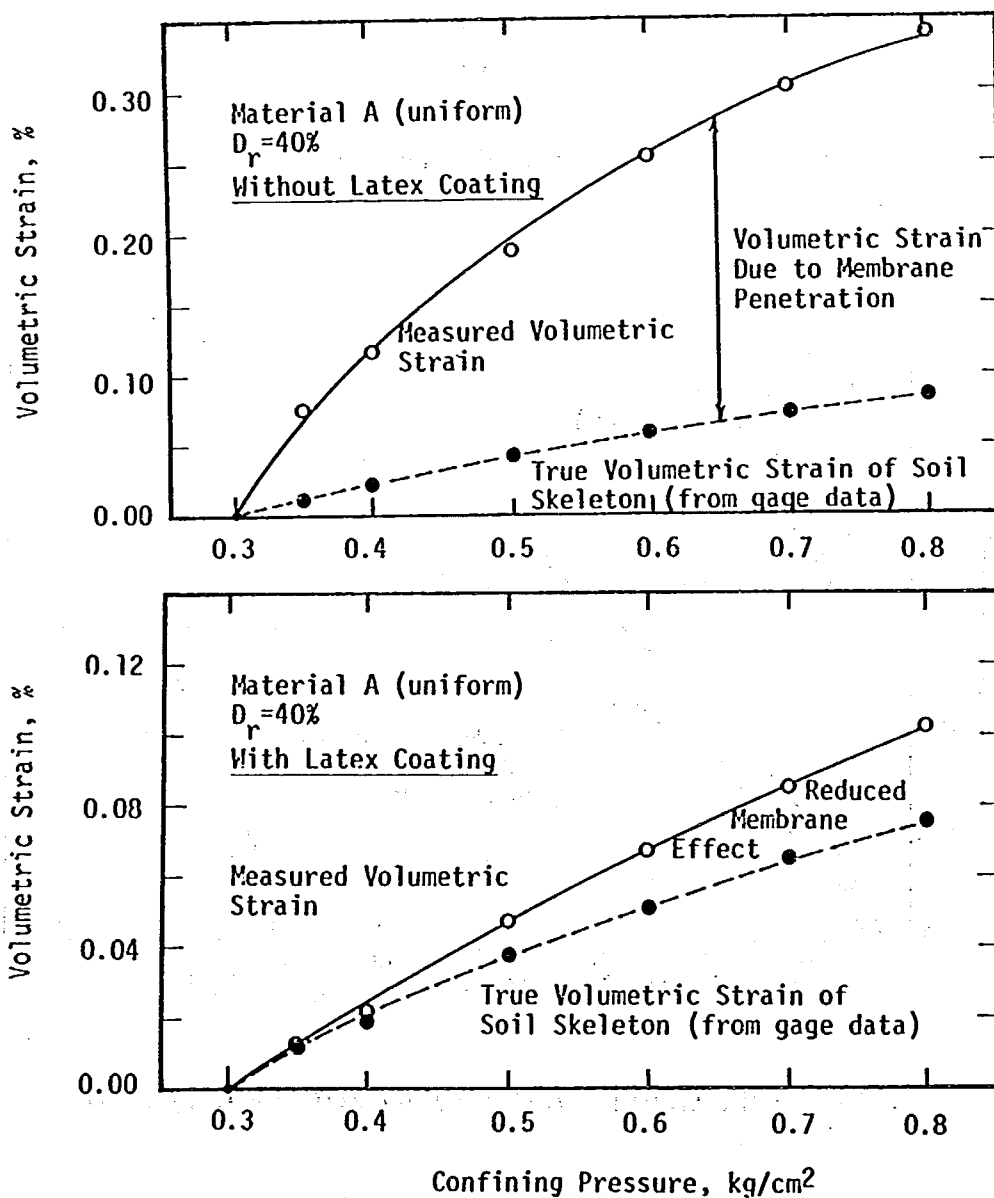


図15 メンブレンの外側に充填材を塗る方法による体積ひずみ特性¹⁾

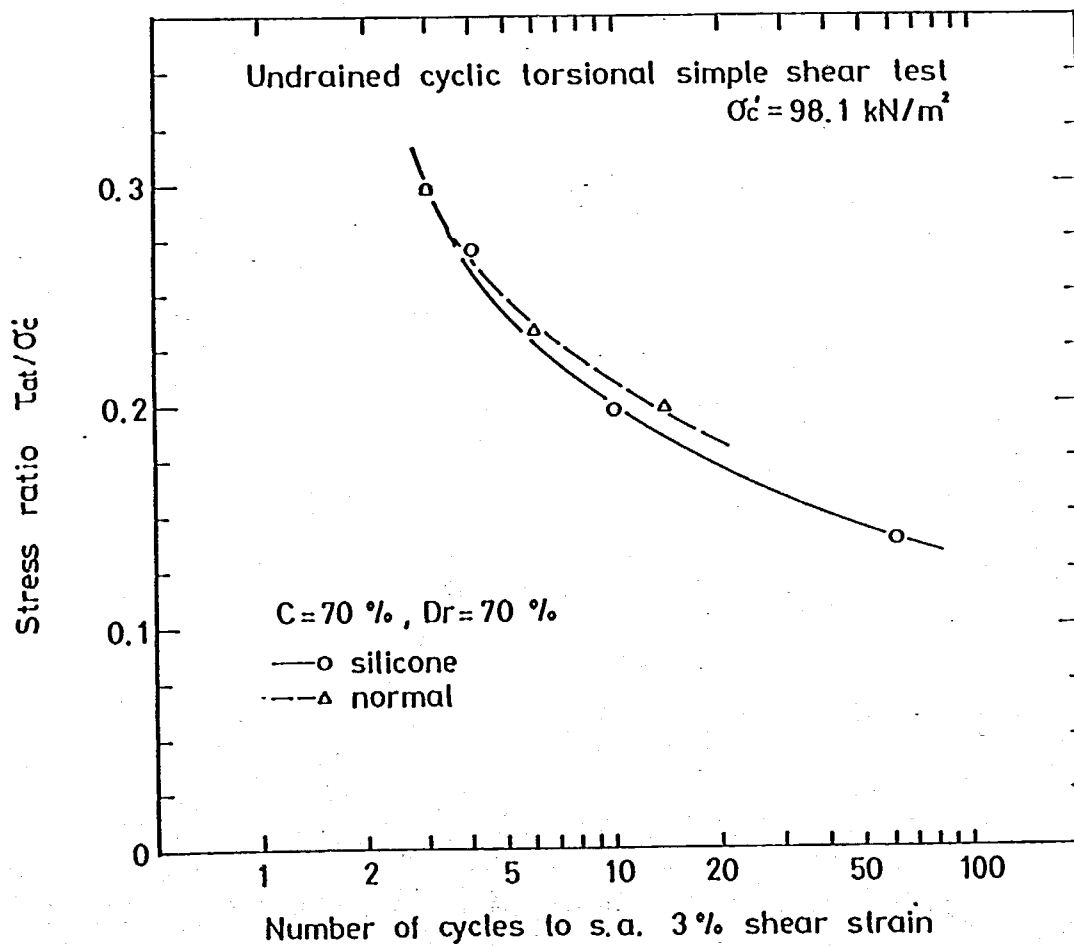
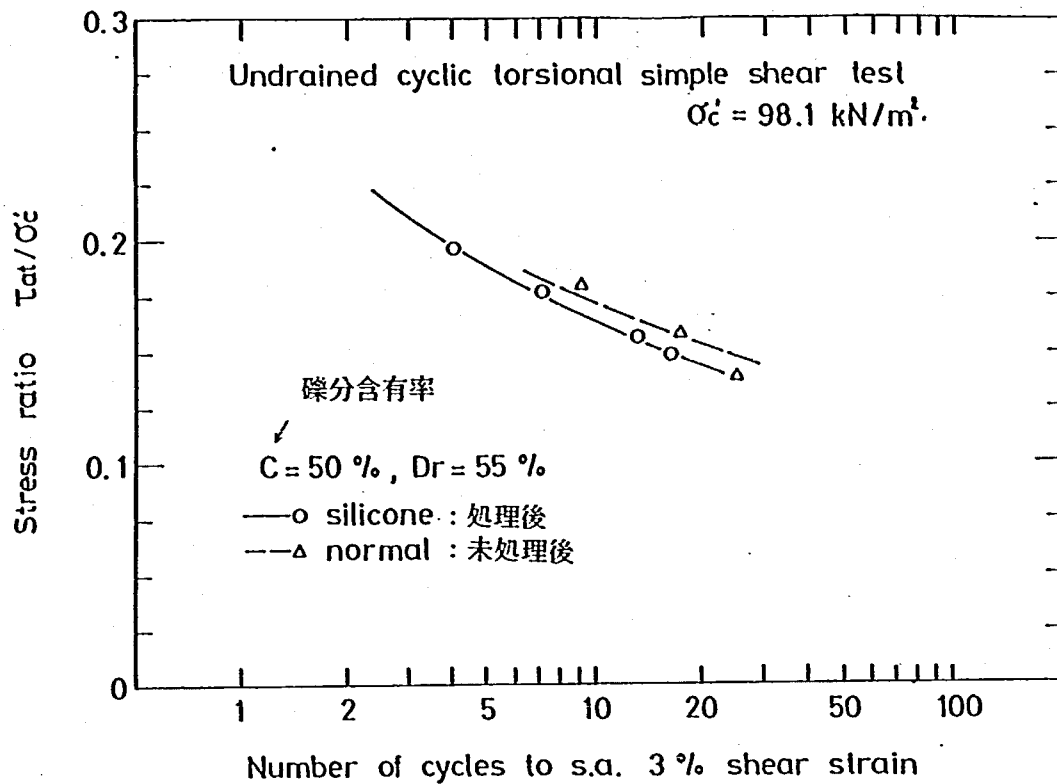


図16 メンブレンの外側に充填材を塗る方法による液状化強度曲線¹⁵⁾

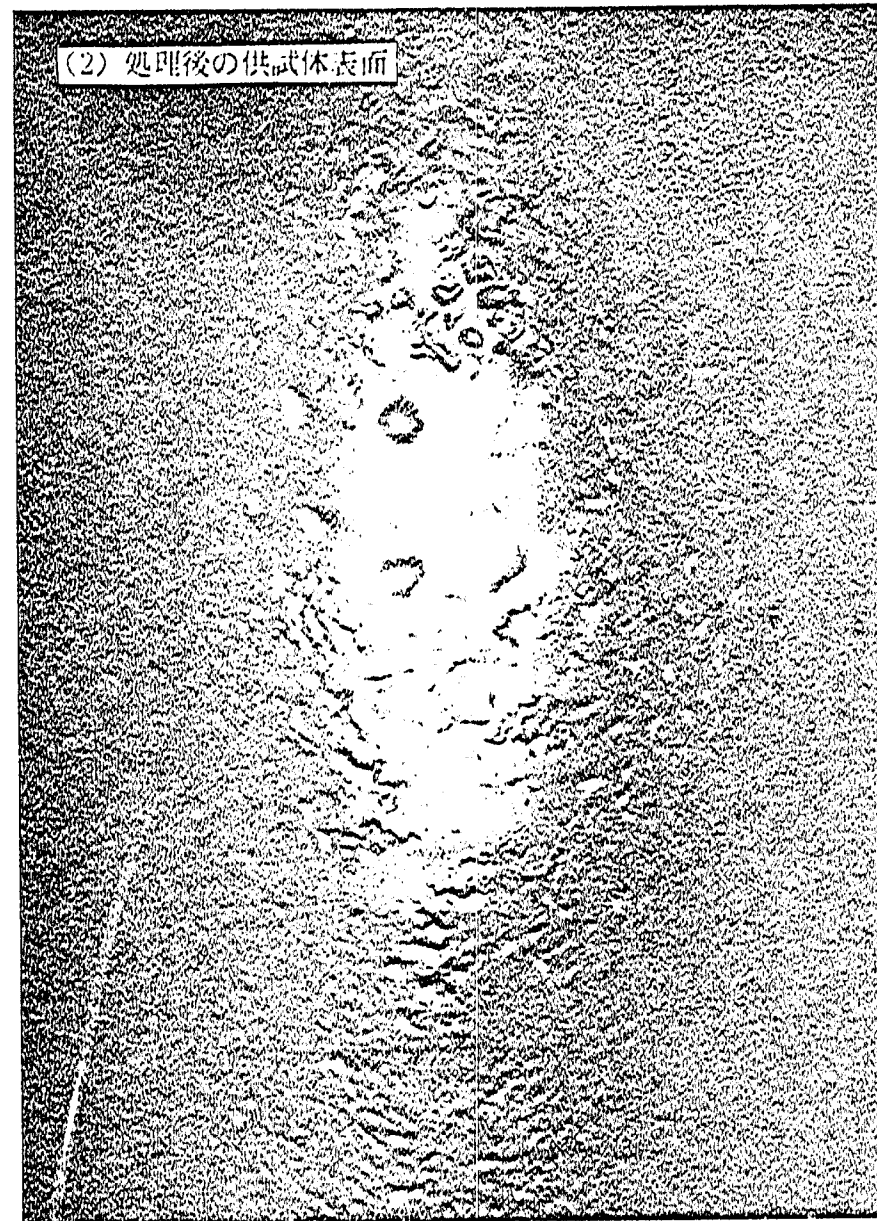
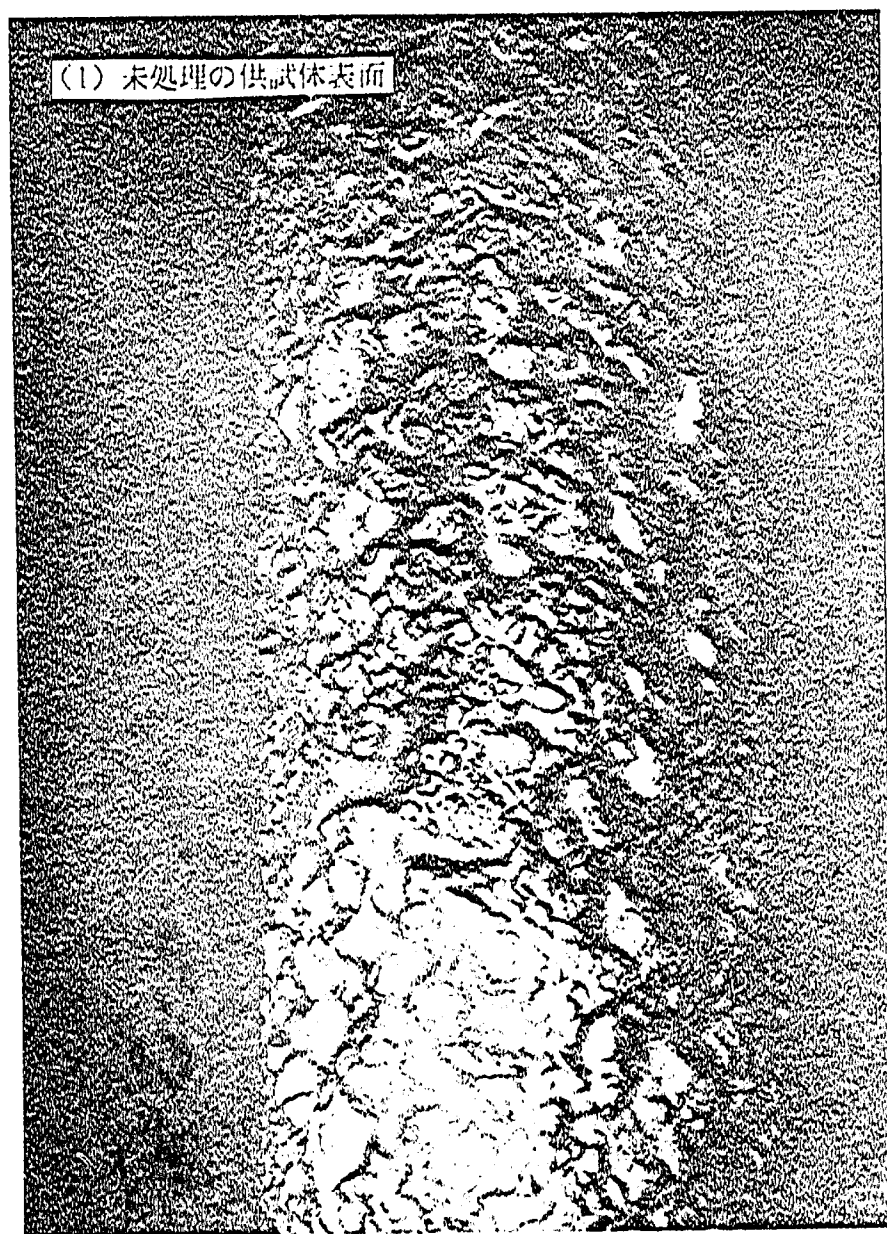


図17 供試体の間隙に砂を流し込む方法¹⁾

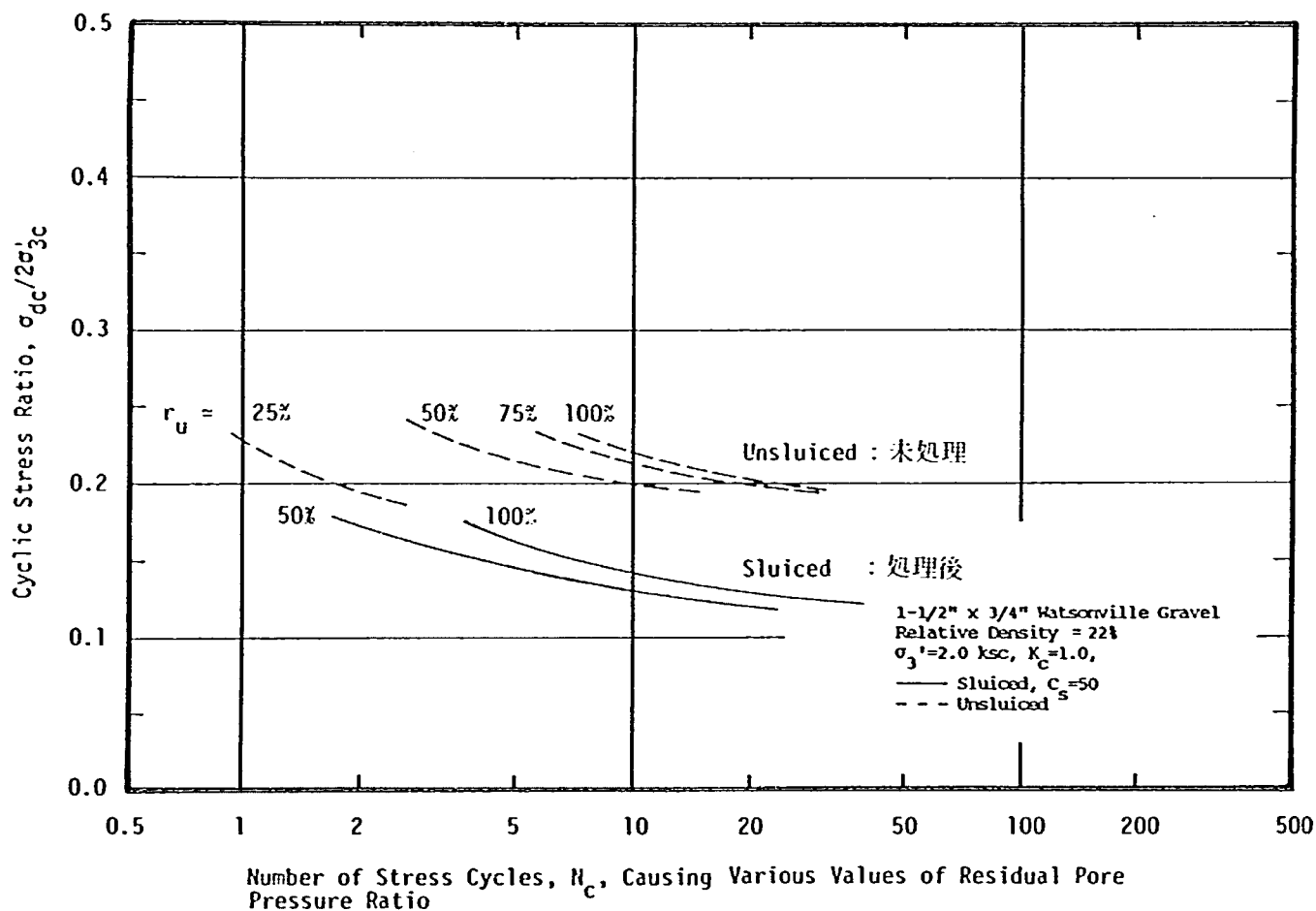


図18 供試体の間隙に砂を流し込む方法による液状化強度曲線¹⁾

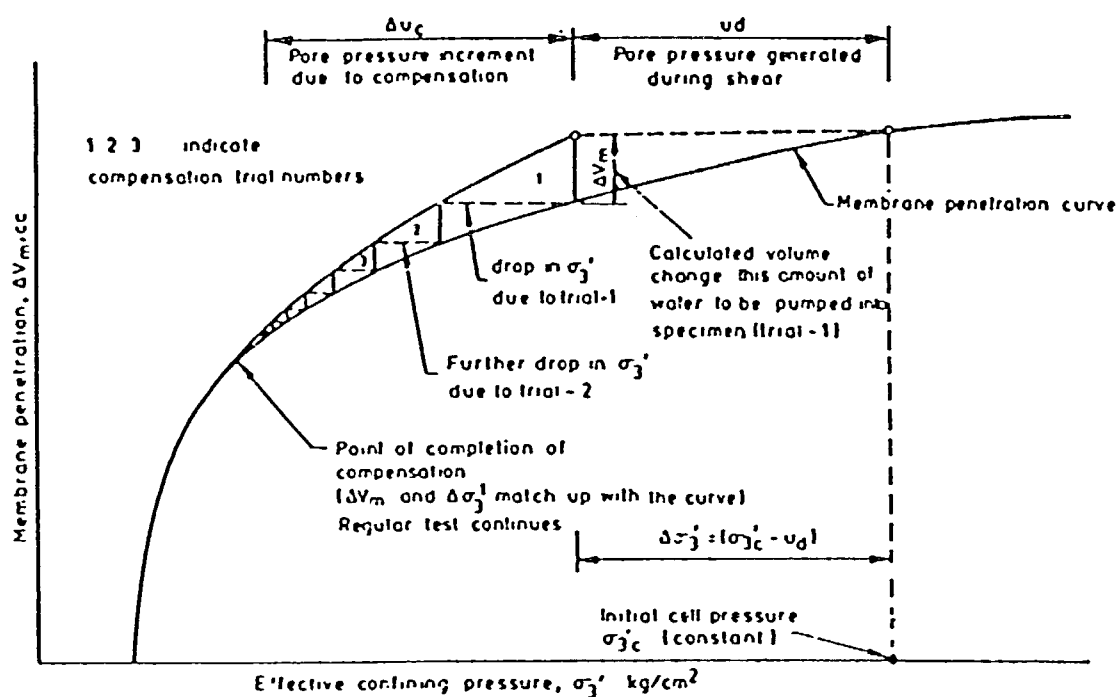


図19 等体積せん断を行う方法¹⁶⁾

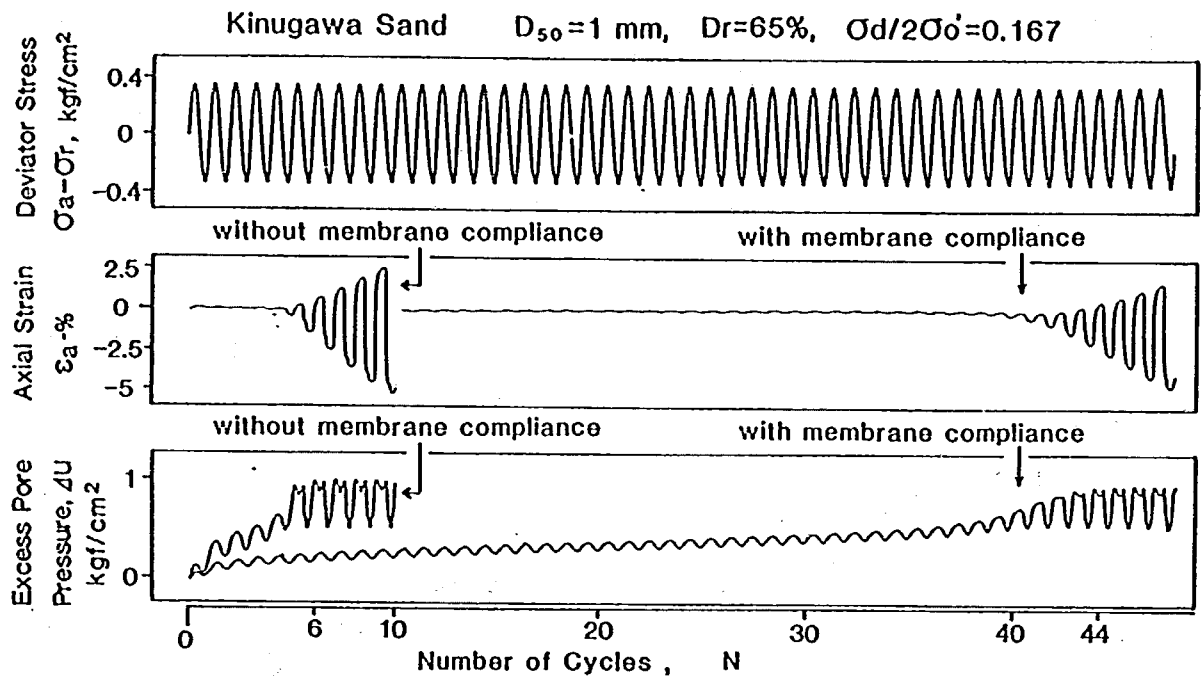


図20 等体積せん断試験と従来の試験の比較¹⁷⁾

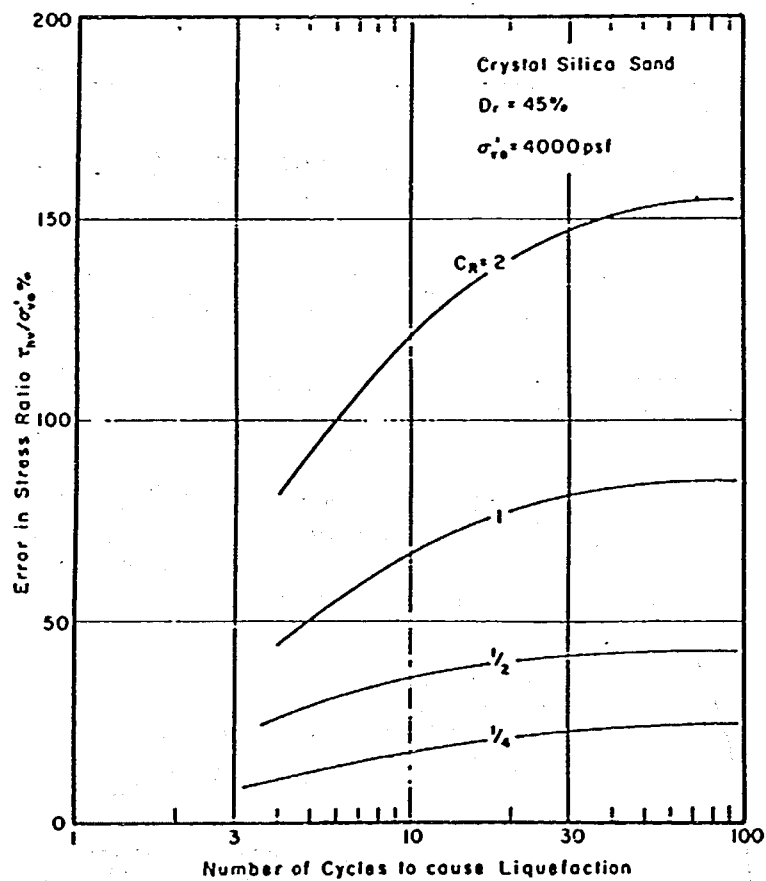


図21 システムコンプライアンス比 C_R と液状化強度の補正量の関係¹⁸⁾

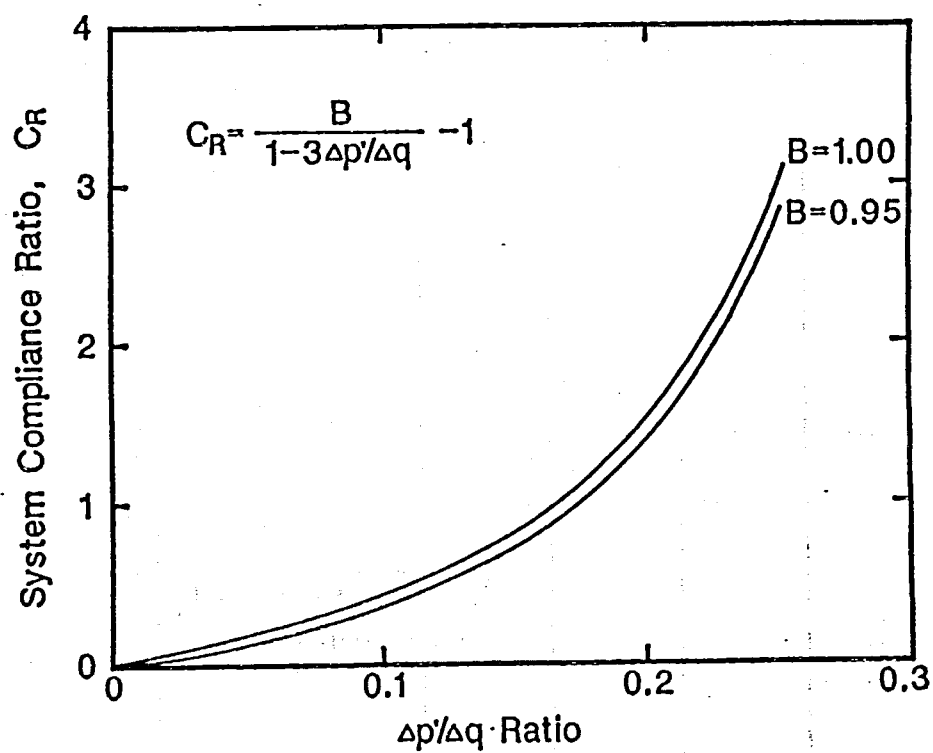
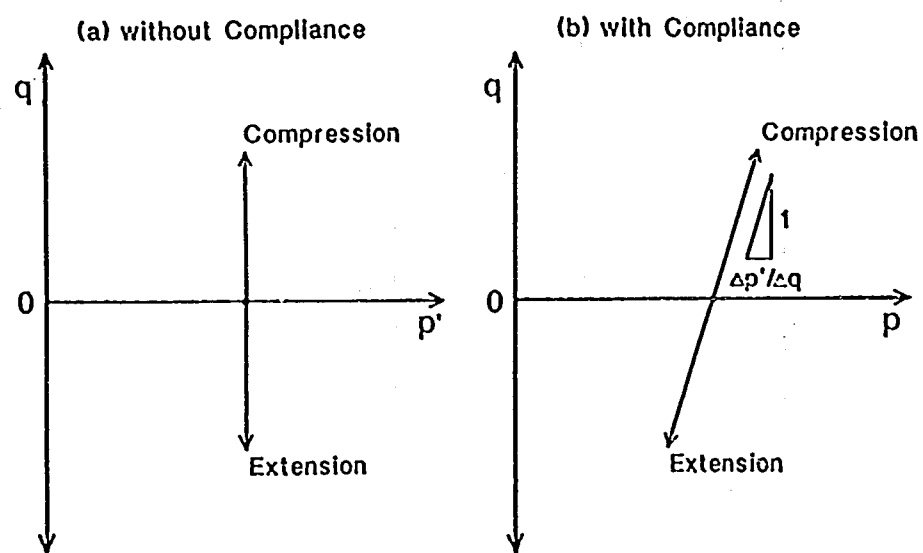


図22 過剰間隙水圧の上昇過程での振幅から C_R を求める方法¹⁹⁾

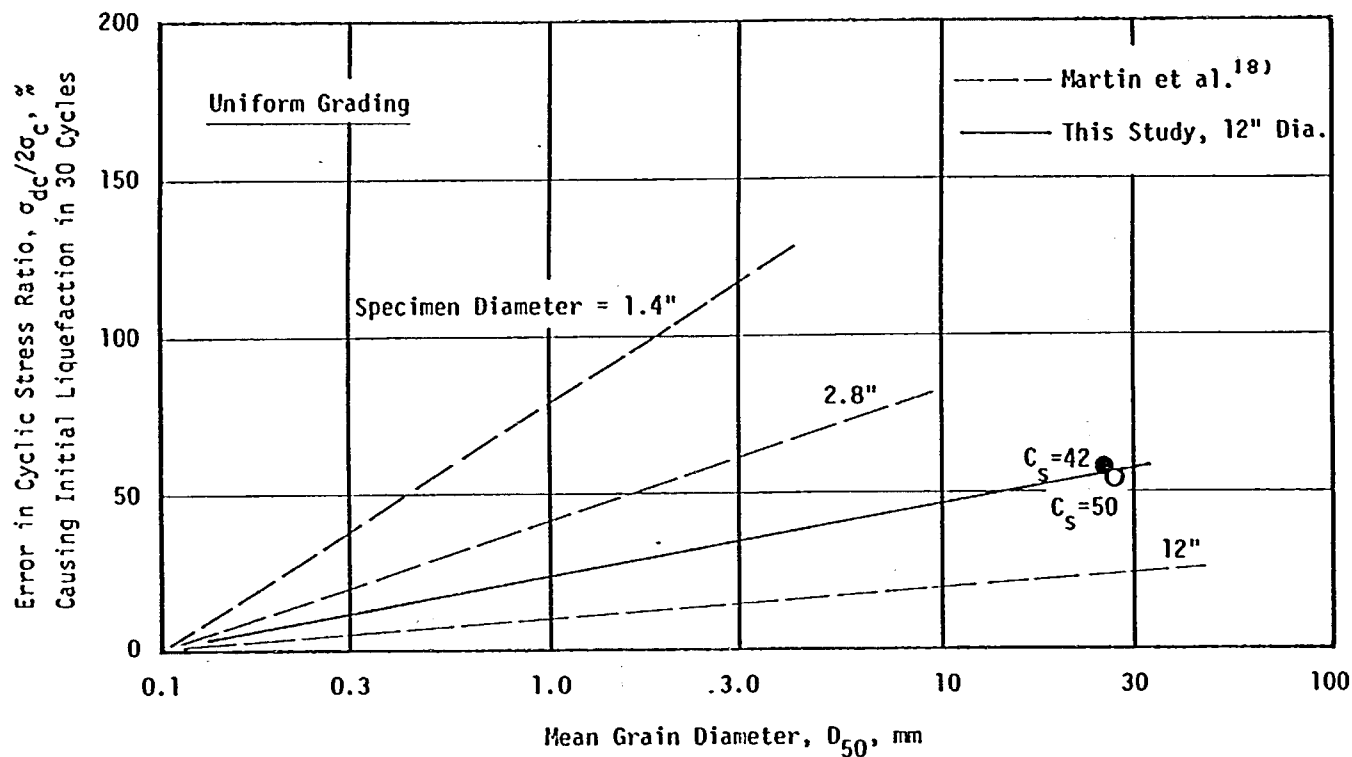


図23 材料の平均粒径と供試体の大きさより補正する方法¹⁾

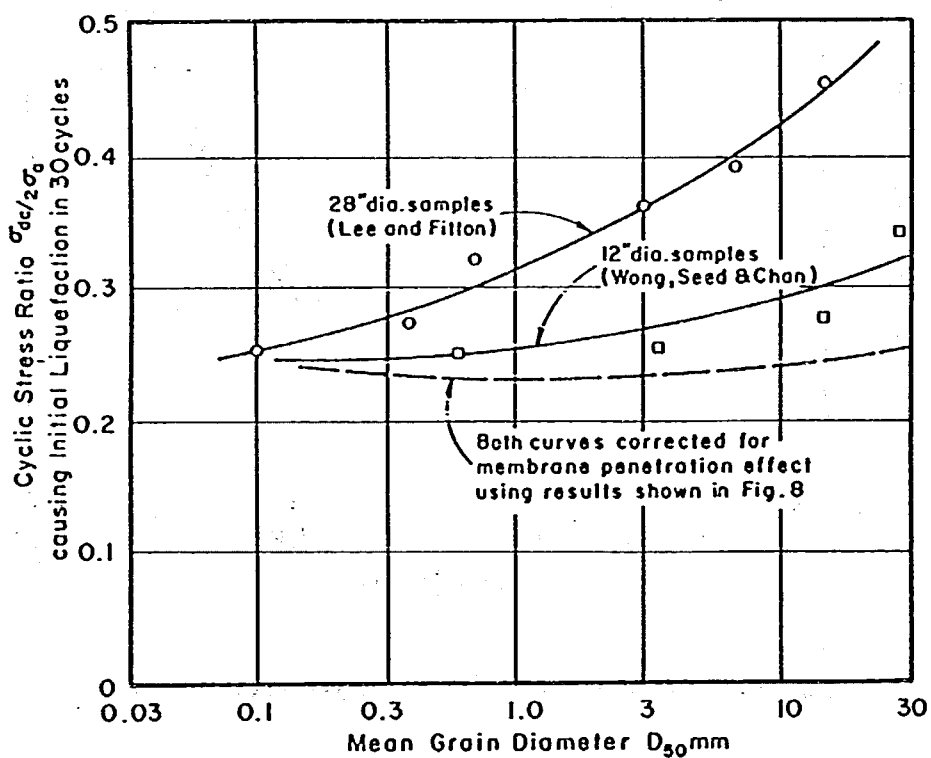
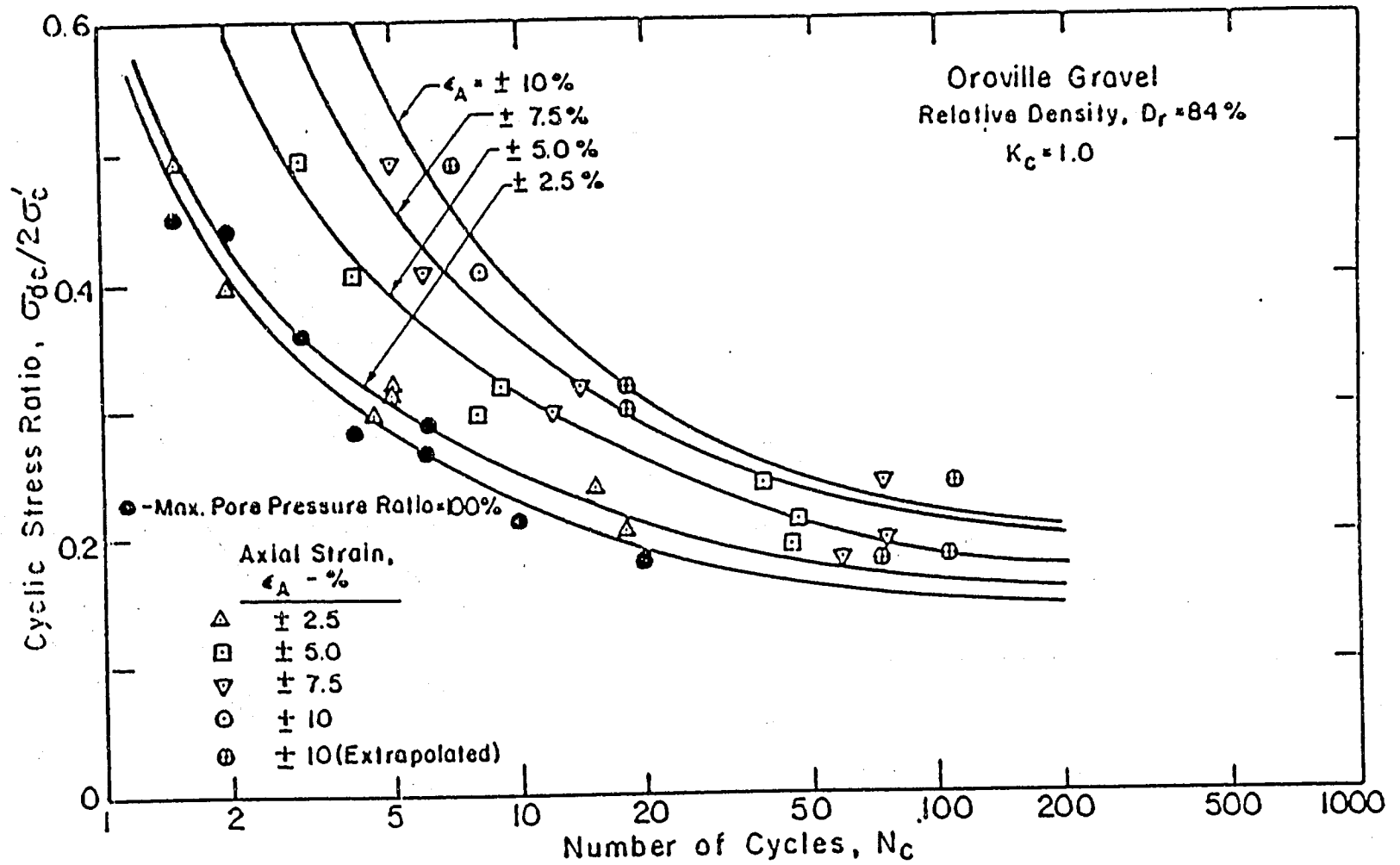


図24 Leeら²⁰⁾、Wongら²¹⁾の試験結果¹⁸⁾



RESULTS OF CYCLIC TRIAXIAL TESTS ON ISOTROPICALLY CONSOLIDATED SAMPLES
AT INITIAL EFFECTIVE CONFINING PRESSURE OF 14 KG/CM²

図25 Banerjeeら¹³⁾の試験結果

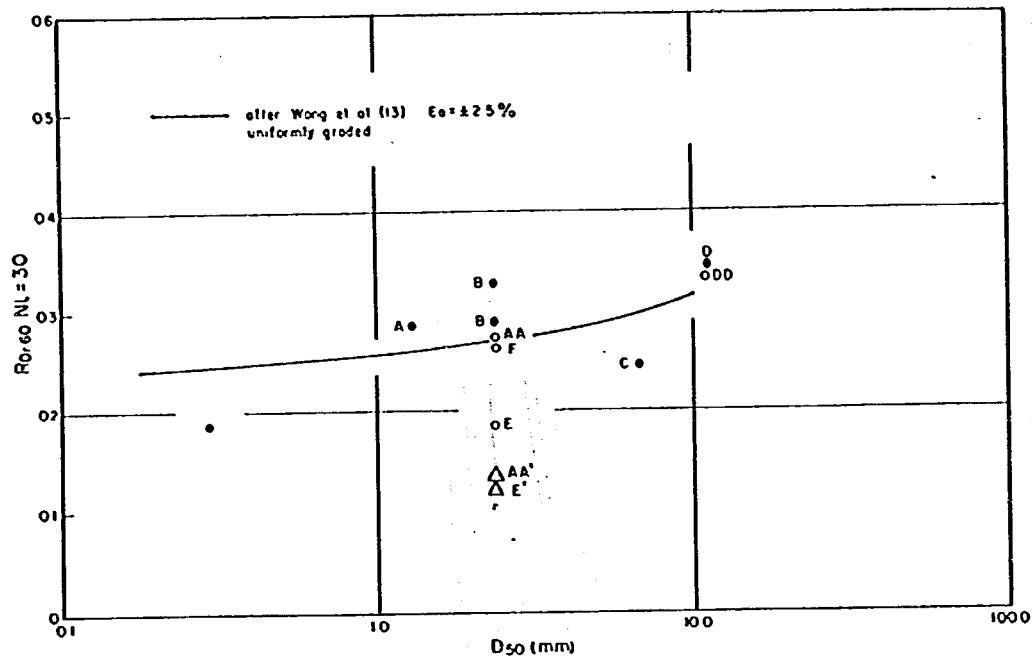


図26 佐々木ら⁴⁾の試験結果

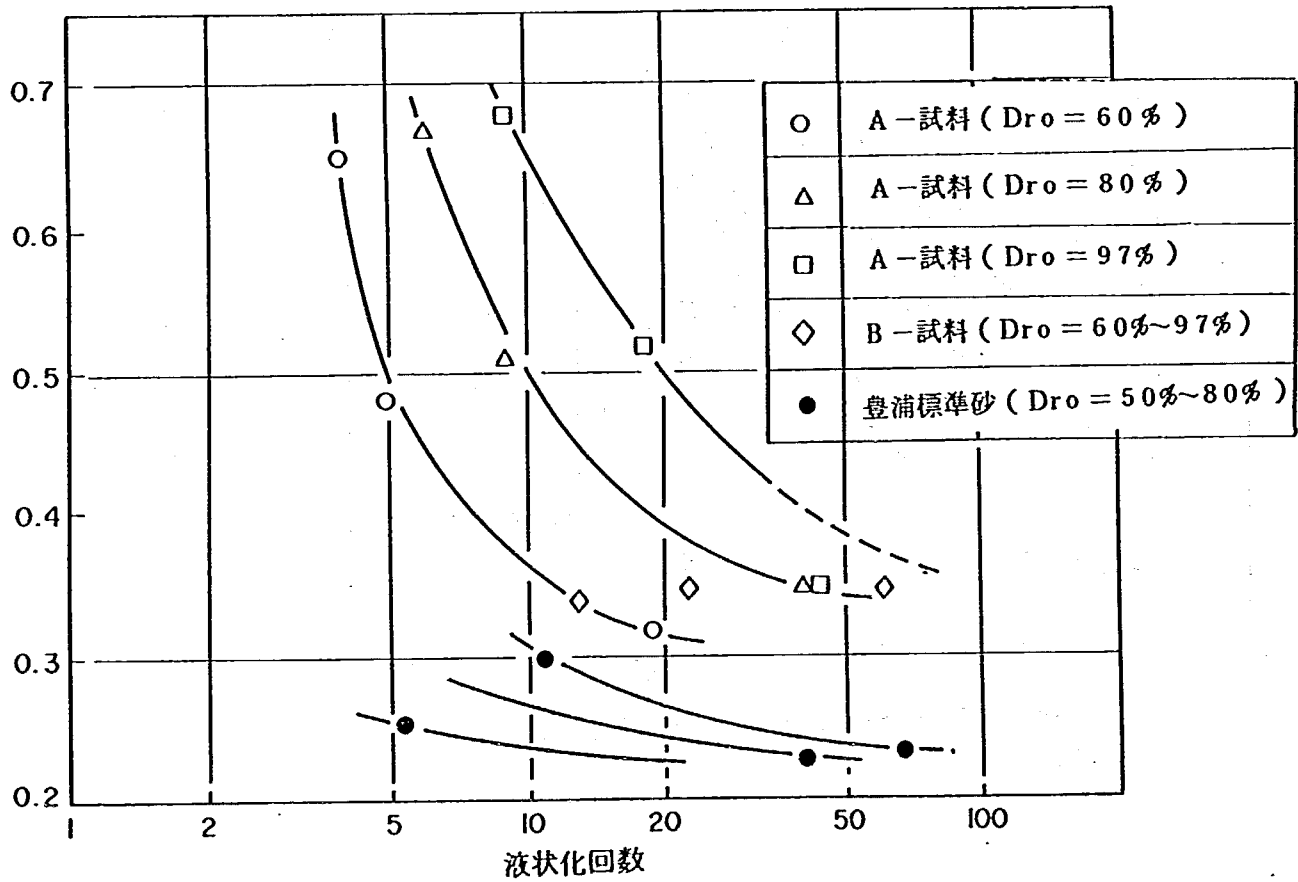


図27 松本ら²²⁾の試験結果

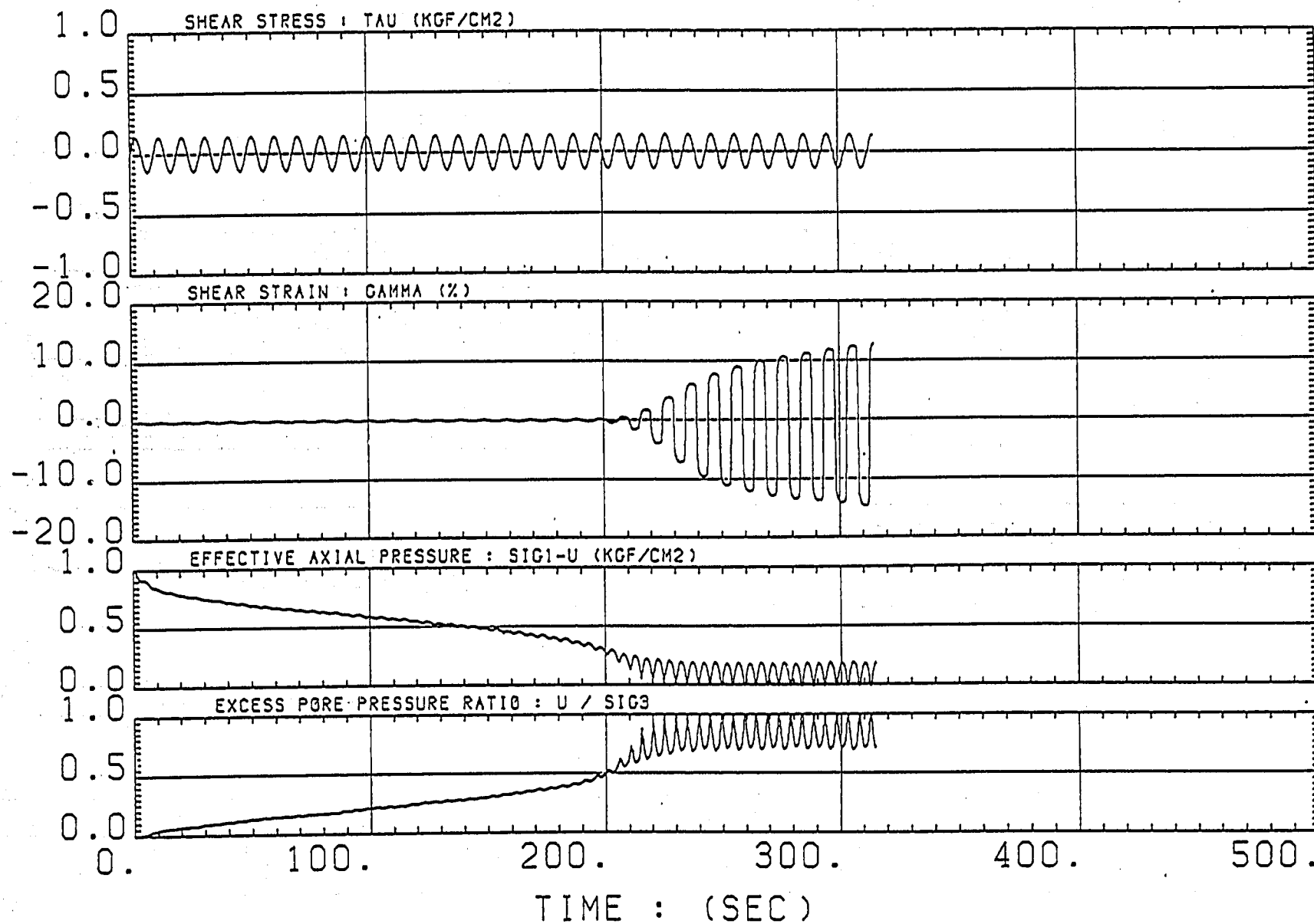


図28 ゆるい砂の液状化試験結果の例 (時刻歴)

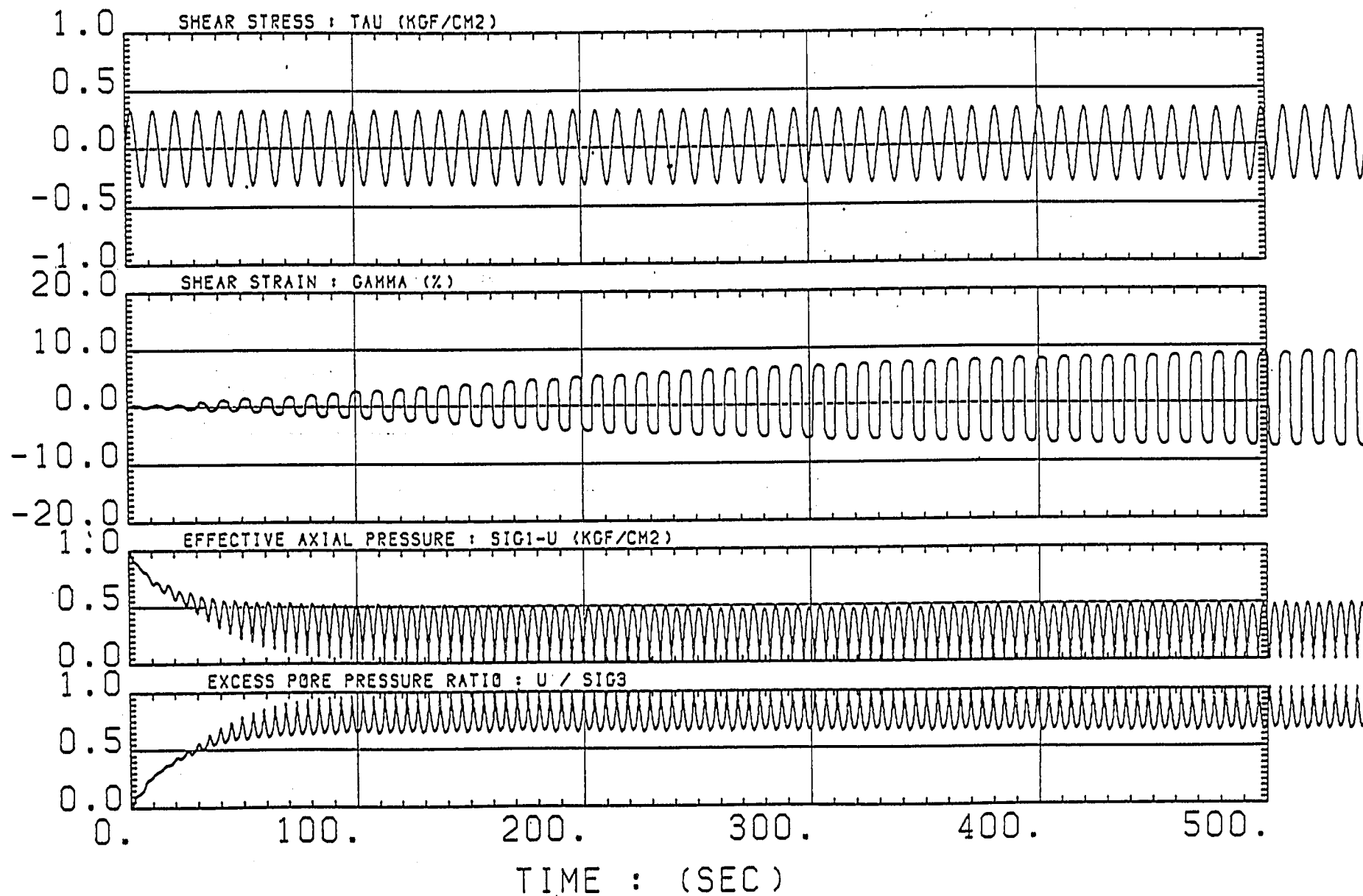


図29 密な砂の液状化試験結果の例（時刻歴）

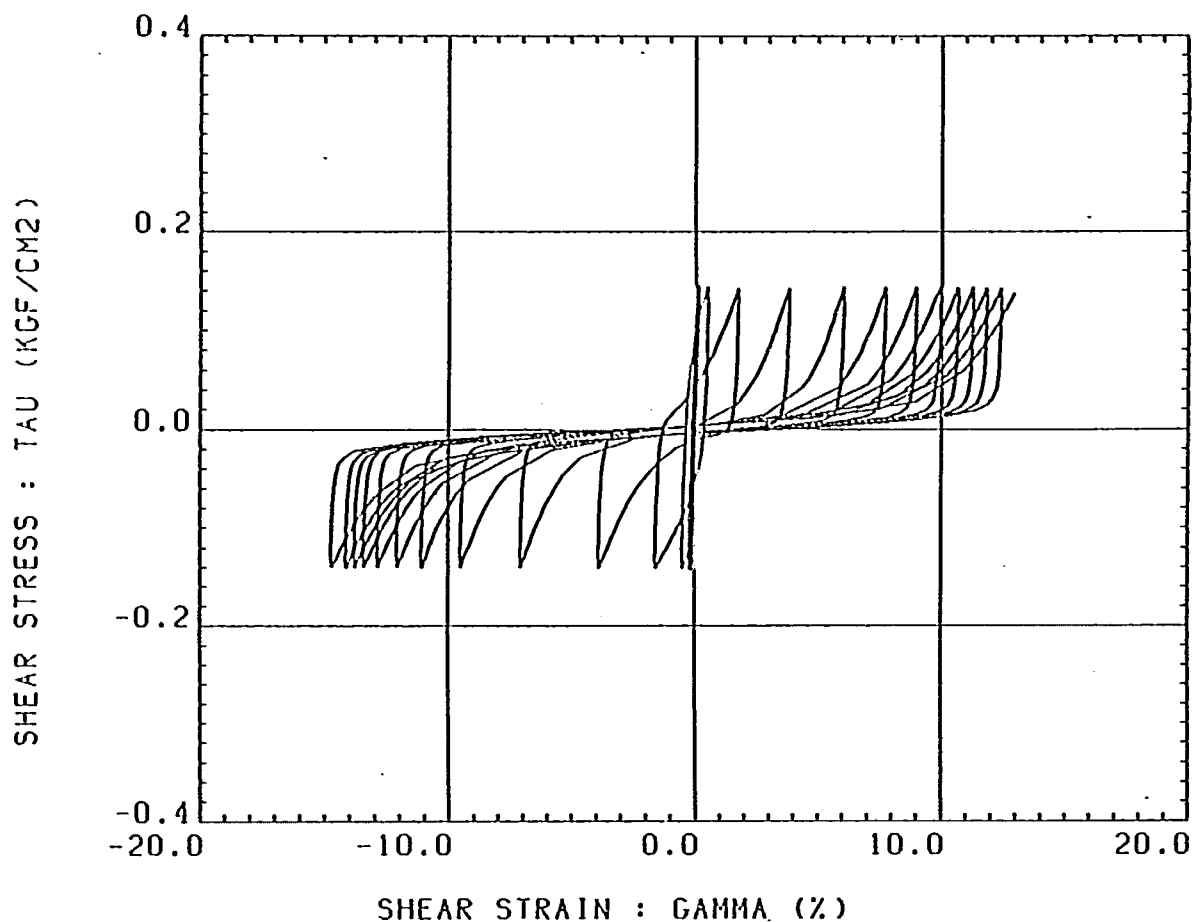


図30 ゆるい砂の液状化試験結果の例（応力・ひずみ関係）

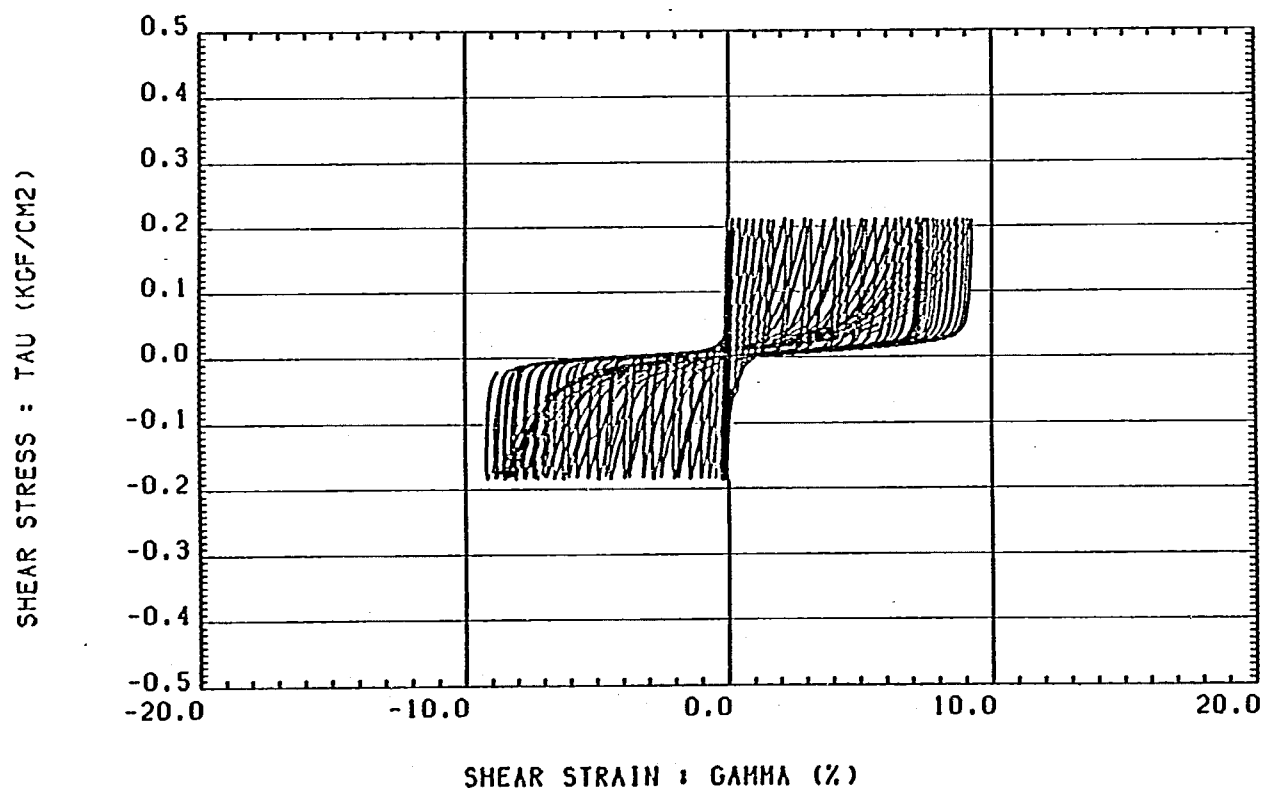


図31 密な砂の液状化試験結果の例（応力・ひずみ関係）

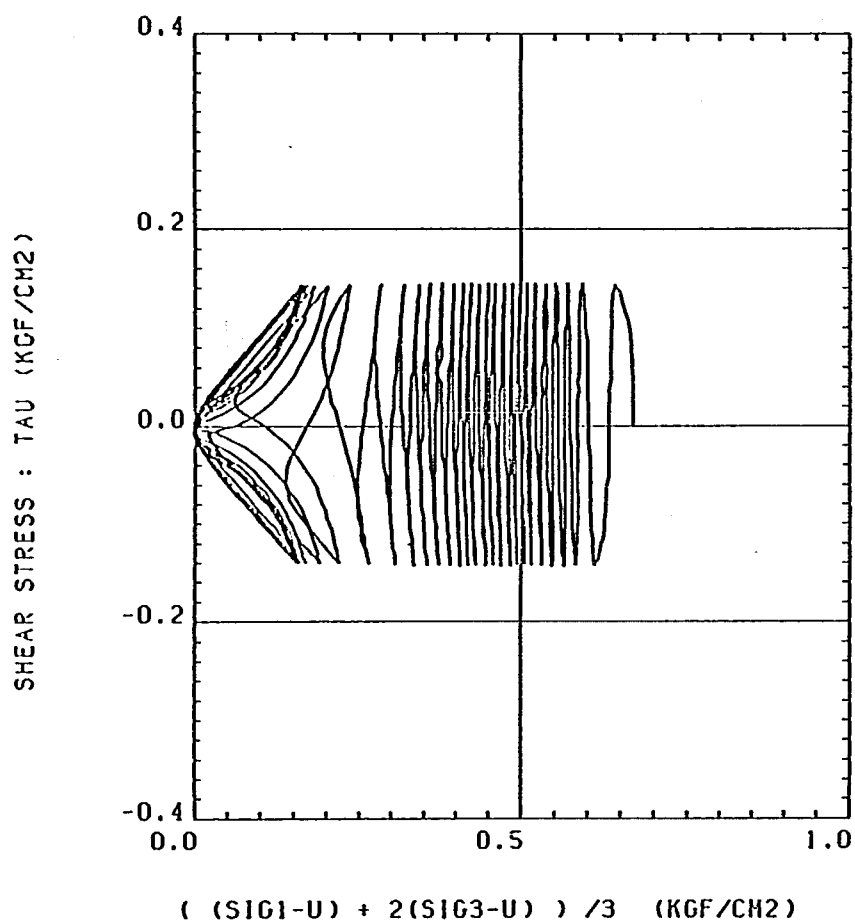


図32 ゆるい砂の液状化試験結果の例（有効応力経路）

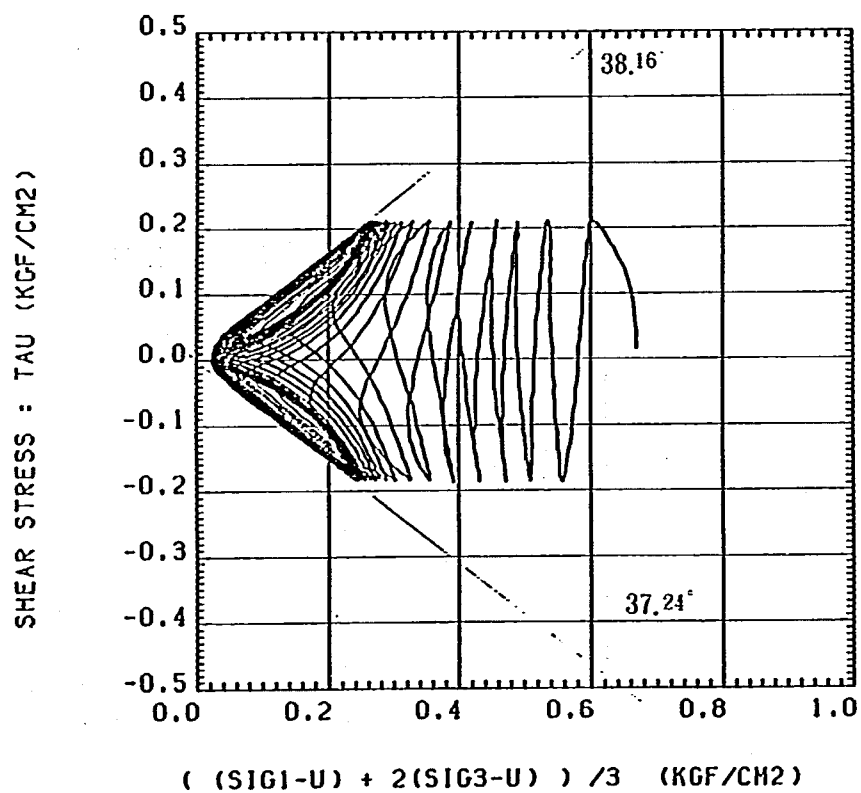


図33 密な砂の液状化試験結果の例（有効応力経路）

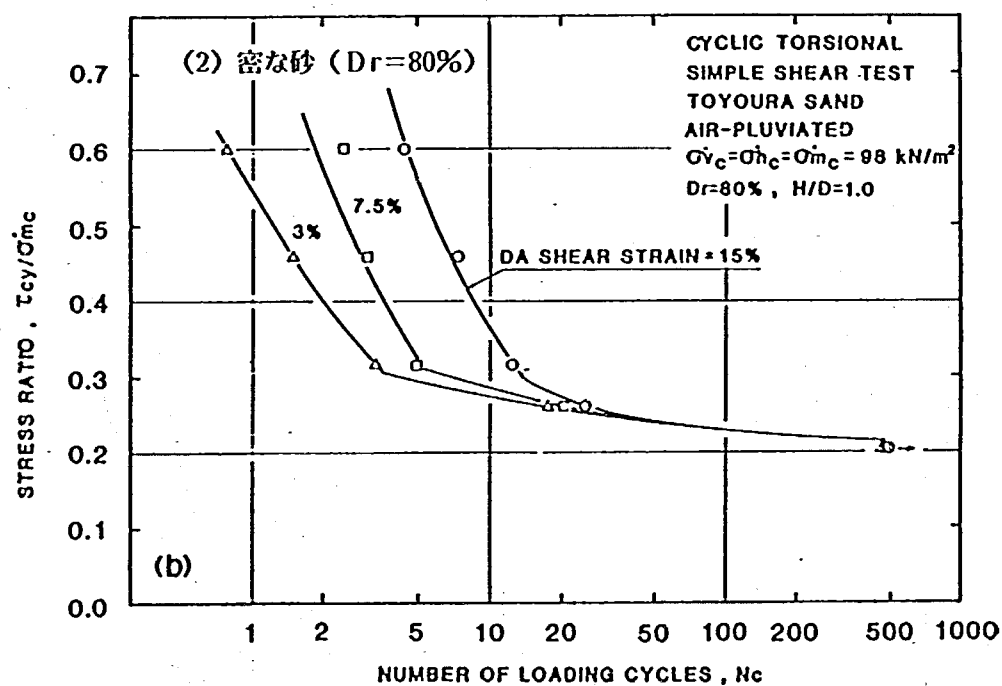
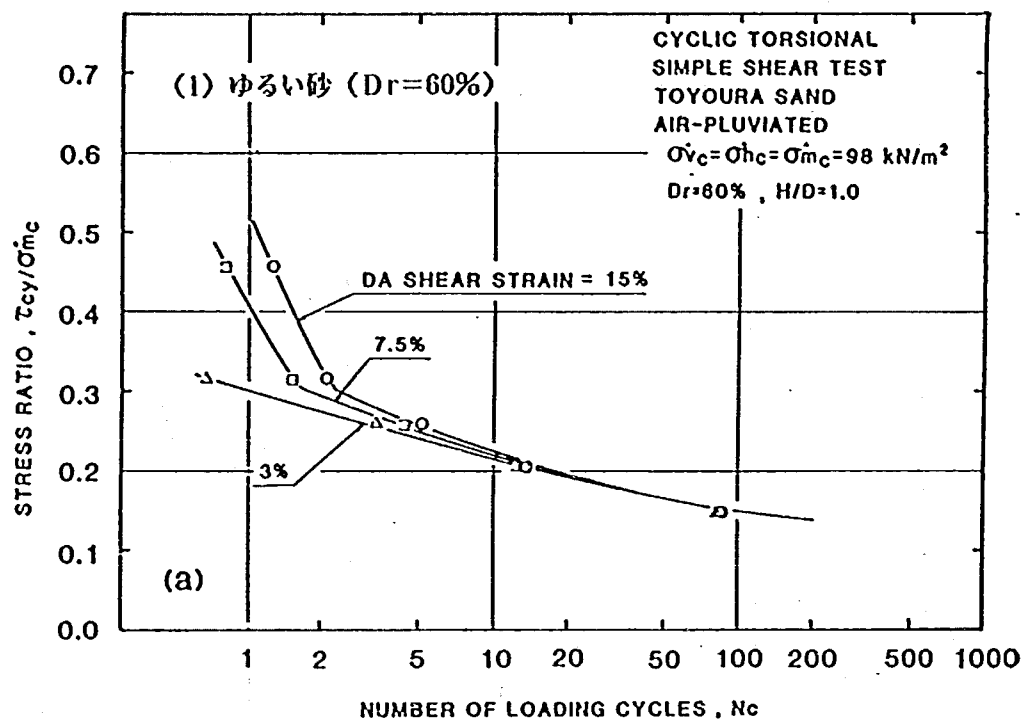


図34 ゆるい砂と密な砂の液状化強度曲線の比較²³⁾

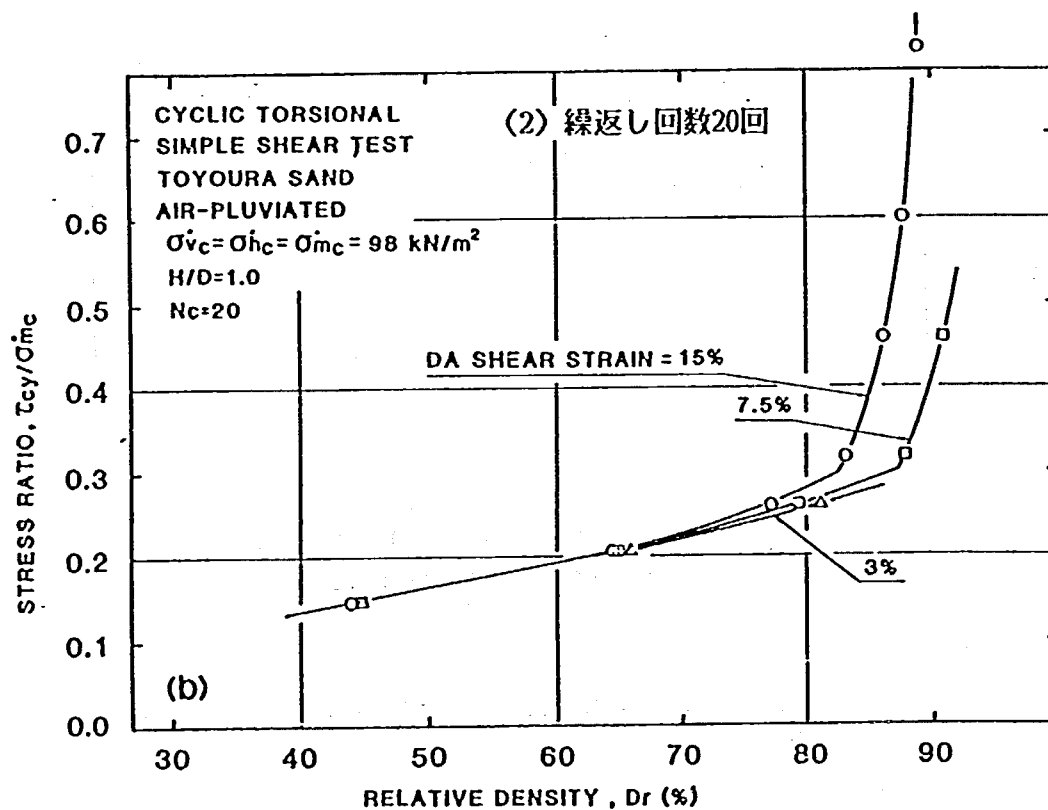
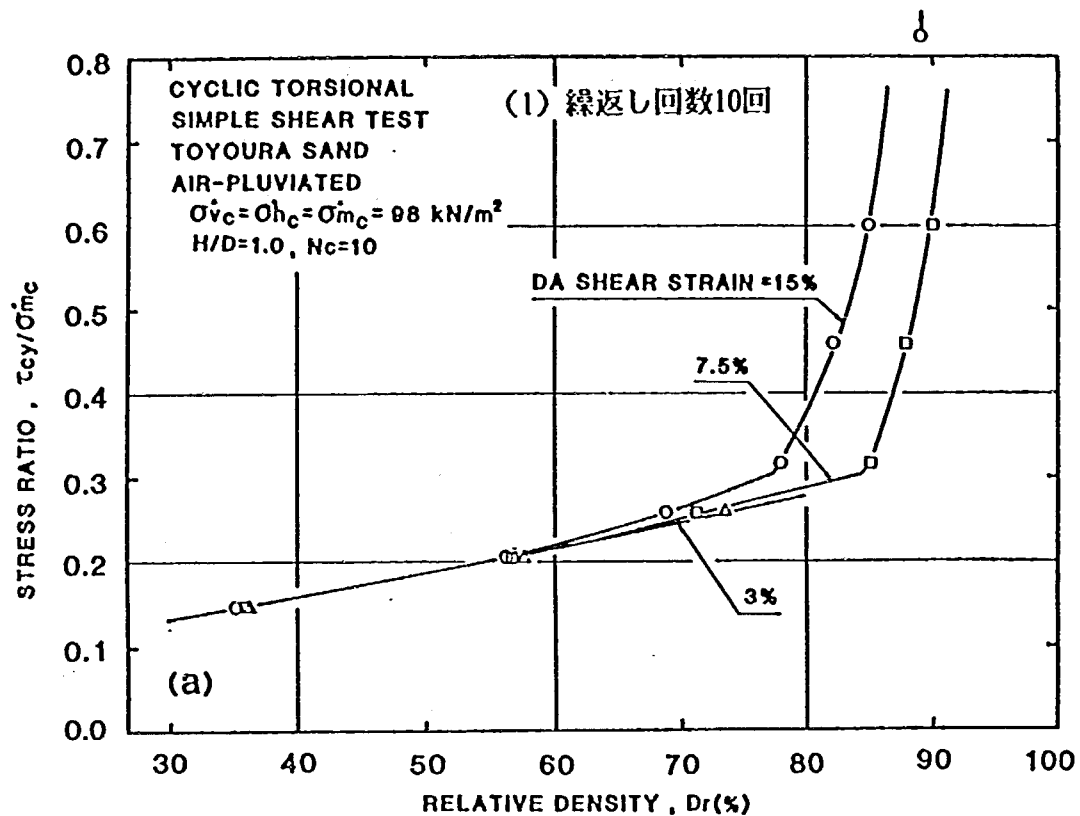


図35 相対密度と液状化強度の関係 (ひずみを変えた場合)²³⁾

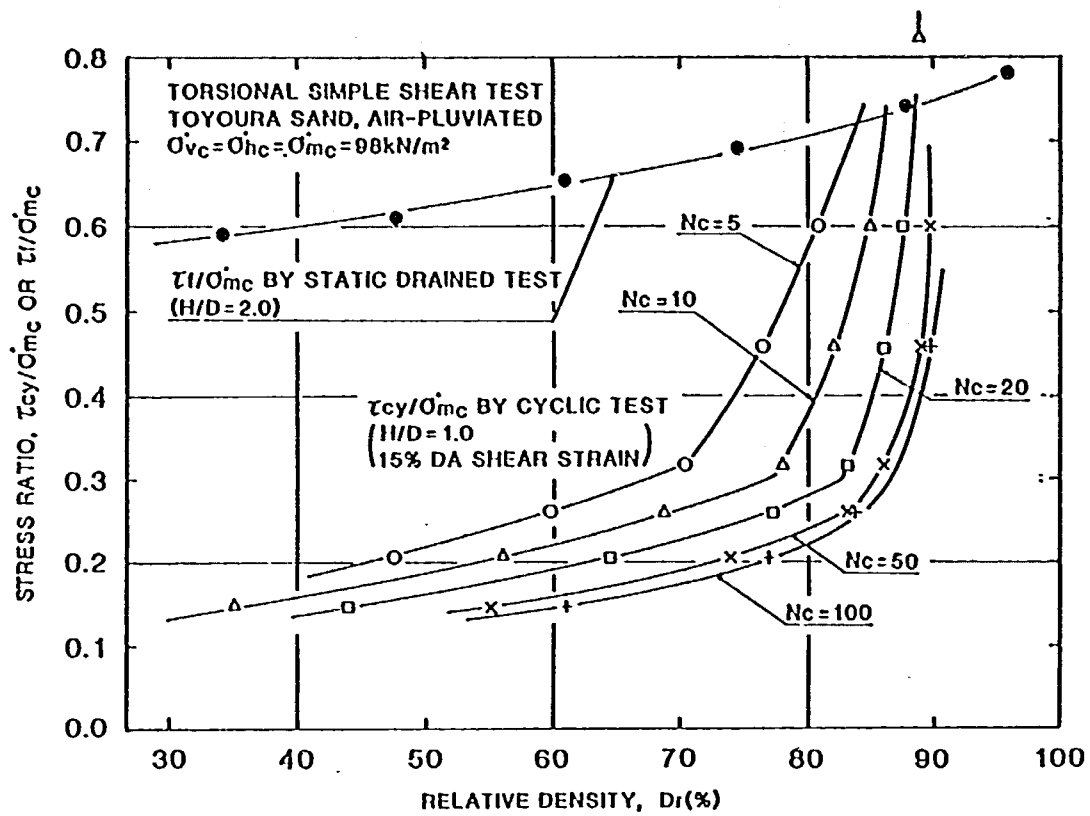


図36 相対密度と液状化強度の関係（繰返し回数を変えた場合）²³⁾

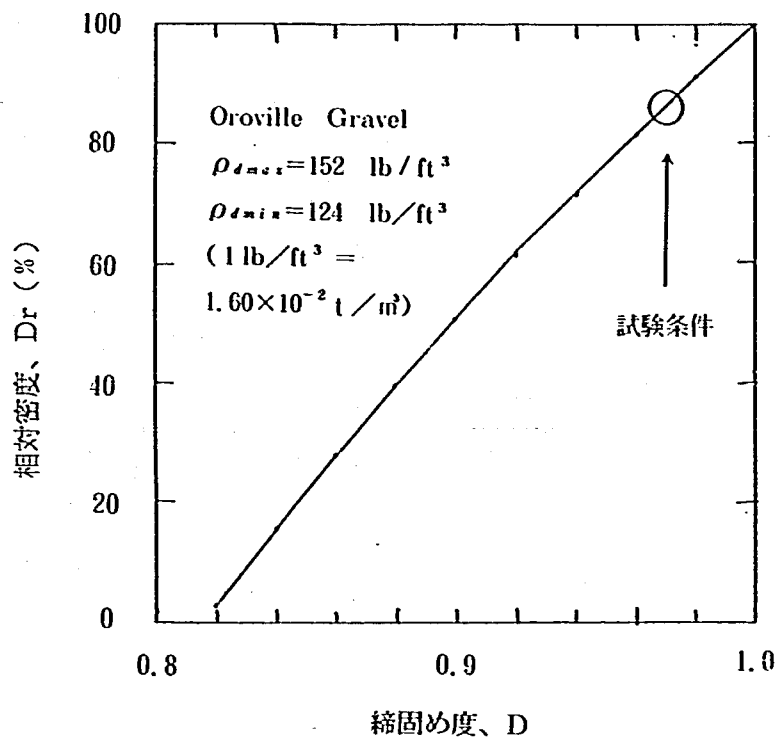


図37-A 締固め度と相対密度の関係の例

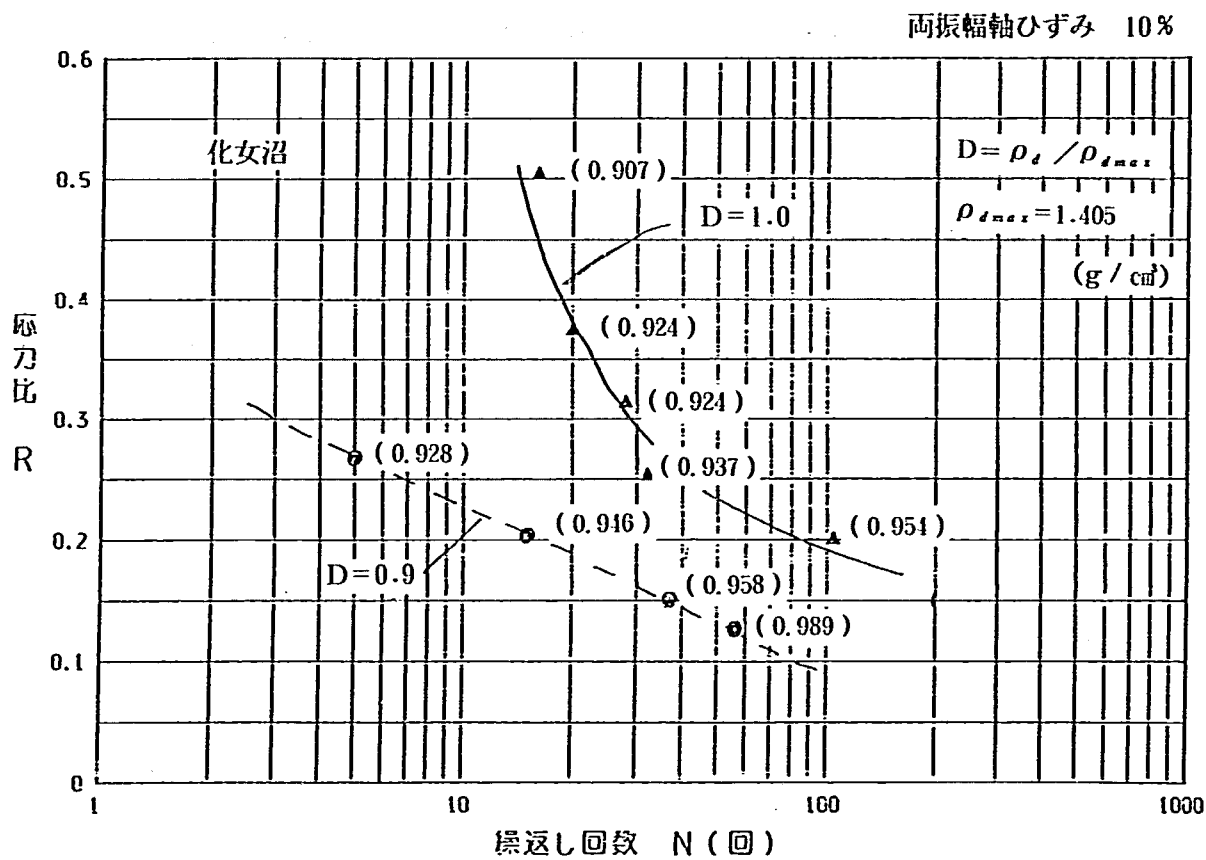
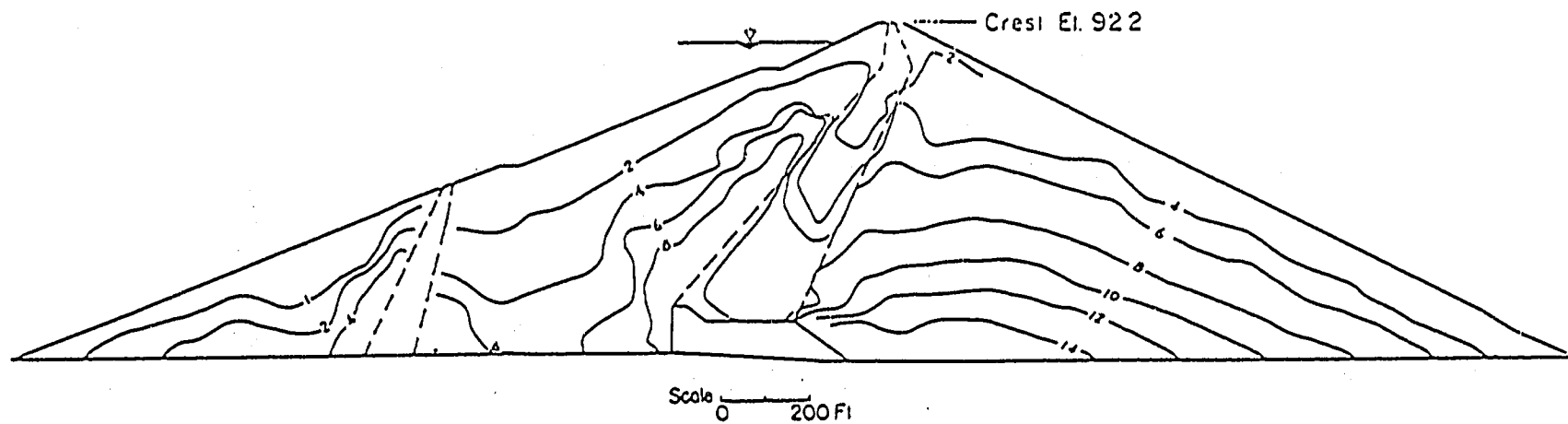
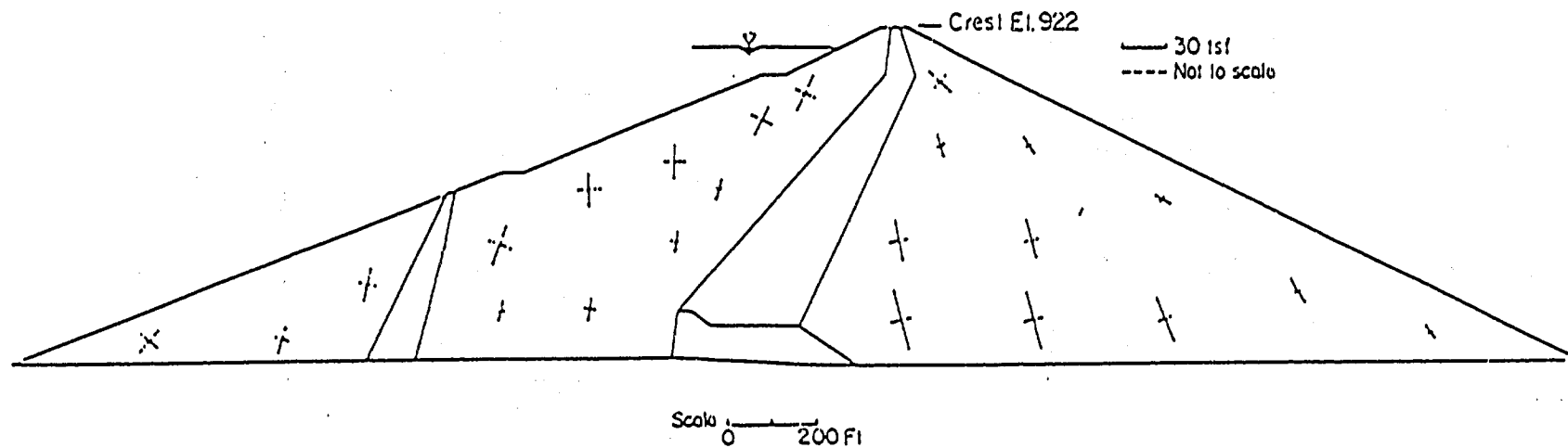


図37-B 締固め度を変えた液状化試験結果



(1) 最大せん断応力



(2) 主応力

図37-C フィルダムの静的応力分布の例¹³⁾

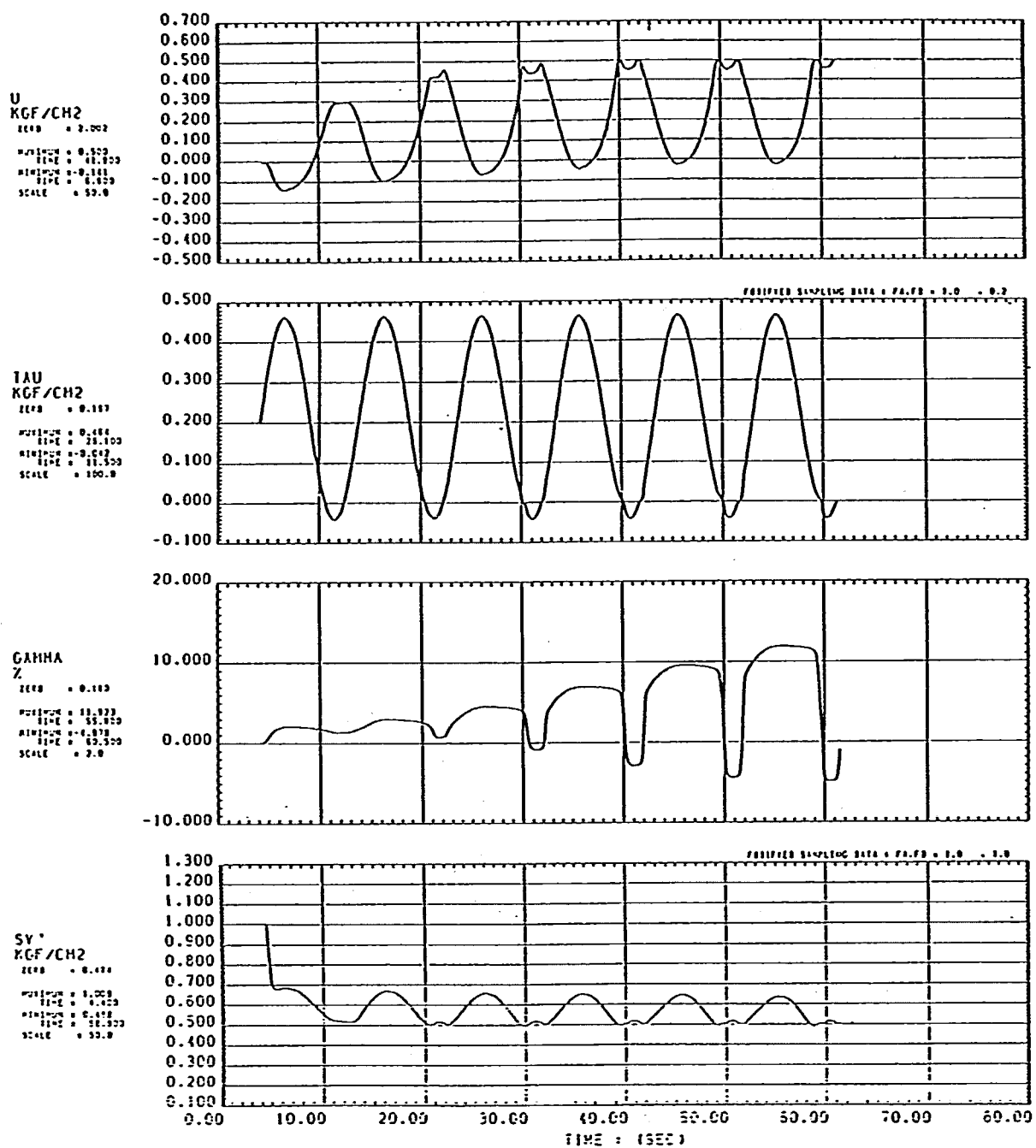
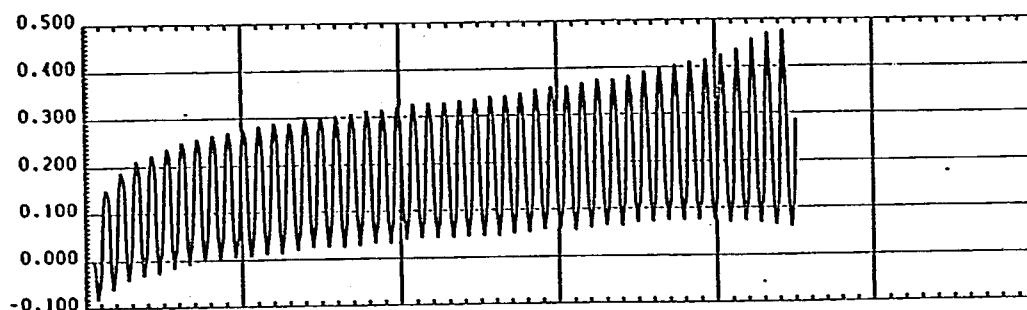
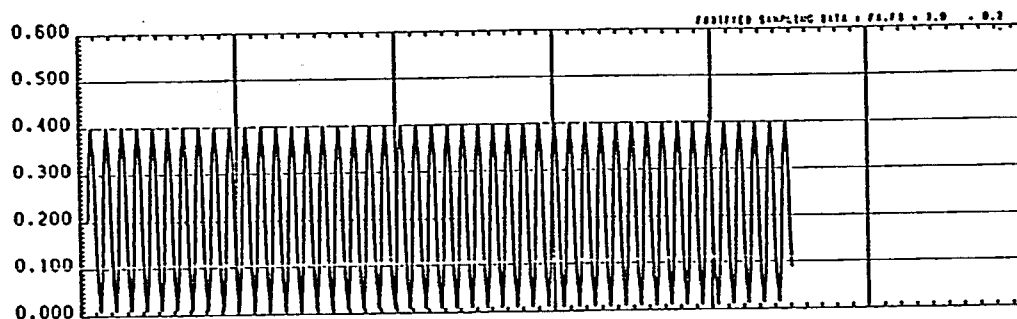


図38 せん断応力方向の反転がある場合の試験結果（時刻歴）

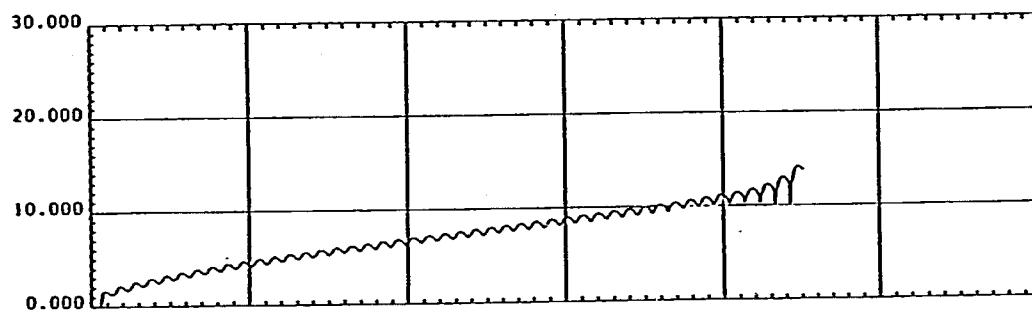
U
KGF/CH2
ZERO = 1.018
MAXIMUM = 0.478
TIME = 447.523
MINIMUM = -0.081
TIME = 3.859
SCALE = 100.0



TAU
KGF/CH2
ZERO = 0.118
MAXIMUM = 0.478
TIME = 27.329
MINIMUM = 0.000
TIME = 100.809
SCALE = 100.0



GAHHA
Z
ZERO = 0.254
MAXIMUM = 11.125
TIME = 447.523
MINIMUM = 0.000
TIME = 0.659
SCALE = 2.0



SY
KGF/CH2
ZERO = 0.193
MAXIMUM = 1.024
TIME = 3.723
MINIMUM = 0.000
TIME = 100.823
SCALE = 50.0

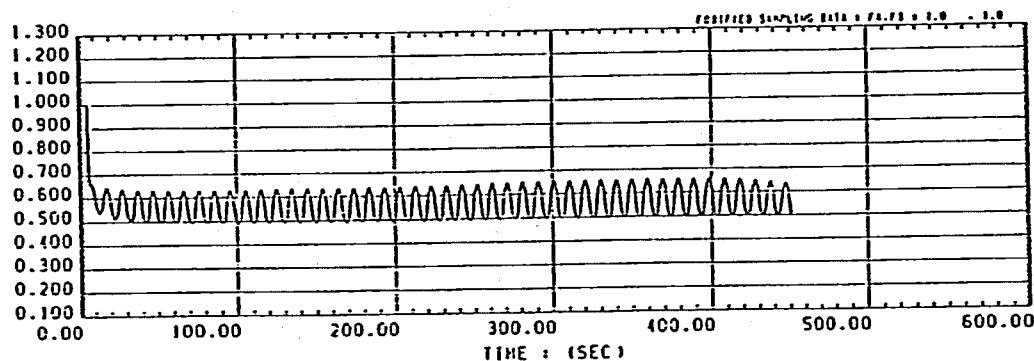


図39 せん断応力方向の反転がない場合の試験結果（時刻歴）

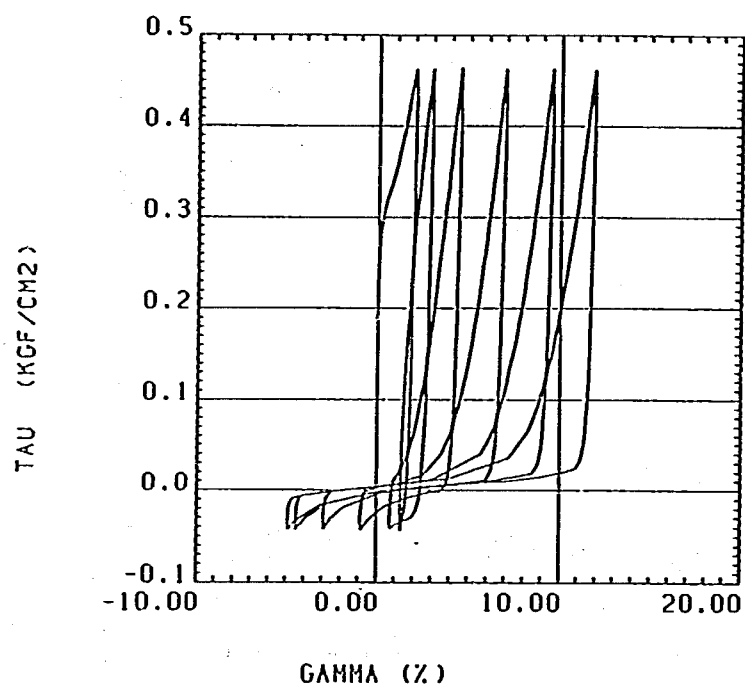


図40 せん断応力方向の反転がある場合の試験結果（応力・ひずみ関係）

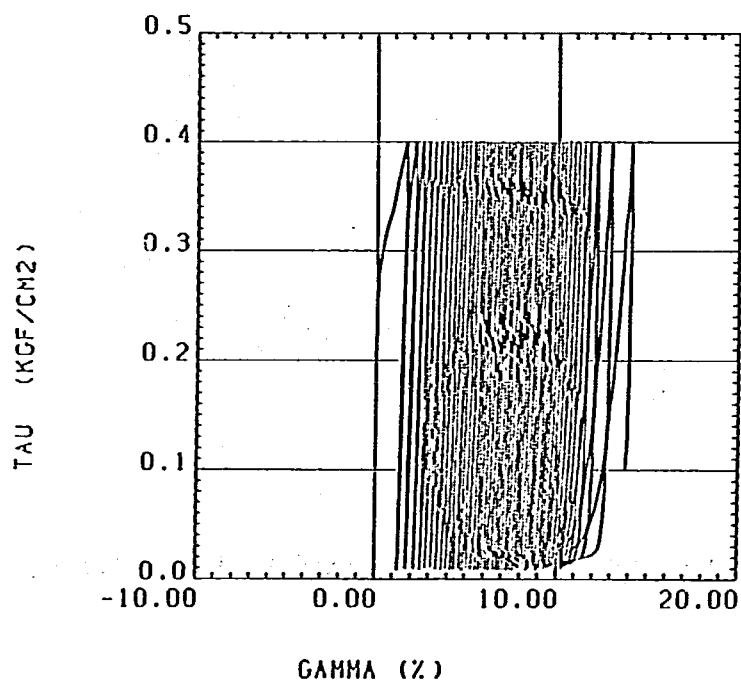


図41 せん断応力方向の反転がない場合の試験結果（応力・ひずみ関係）

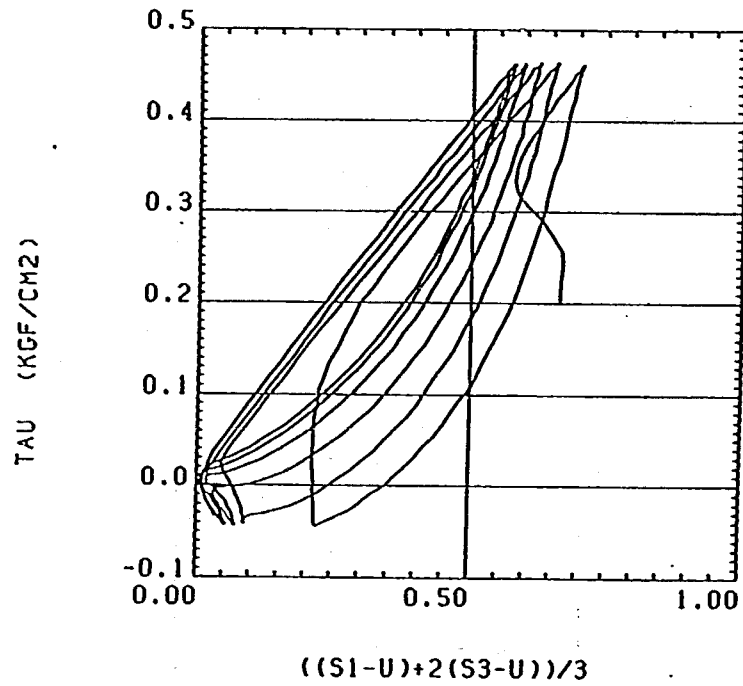


図42 せん断応力方向の反転がある場合の試験結果（有効応力経路）

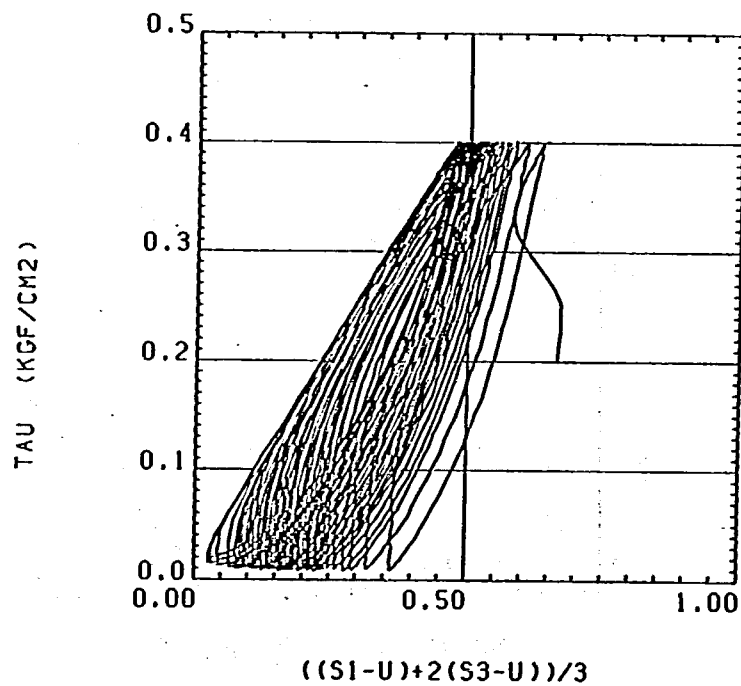


図43 せん断応力方向の反転がない場合の試験結果（有効応力経路）

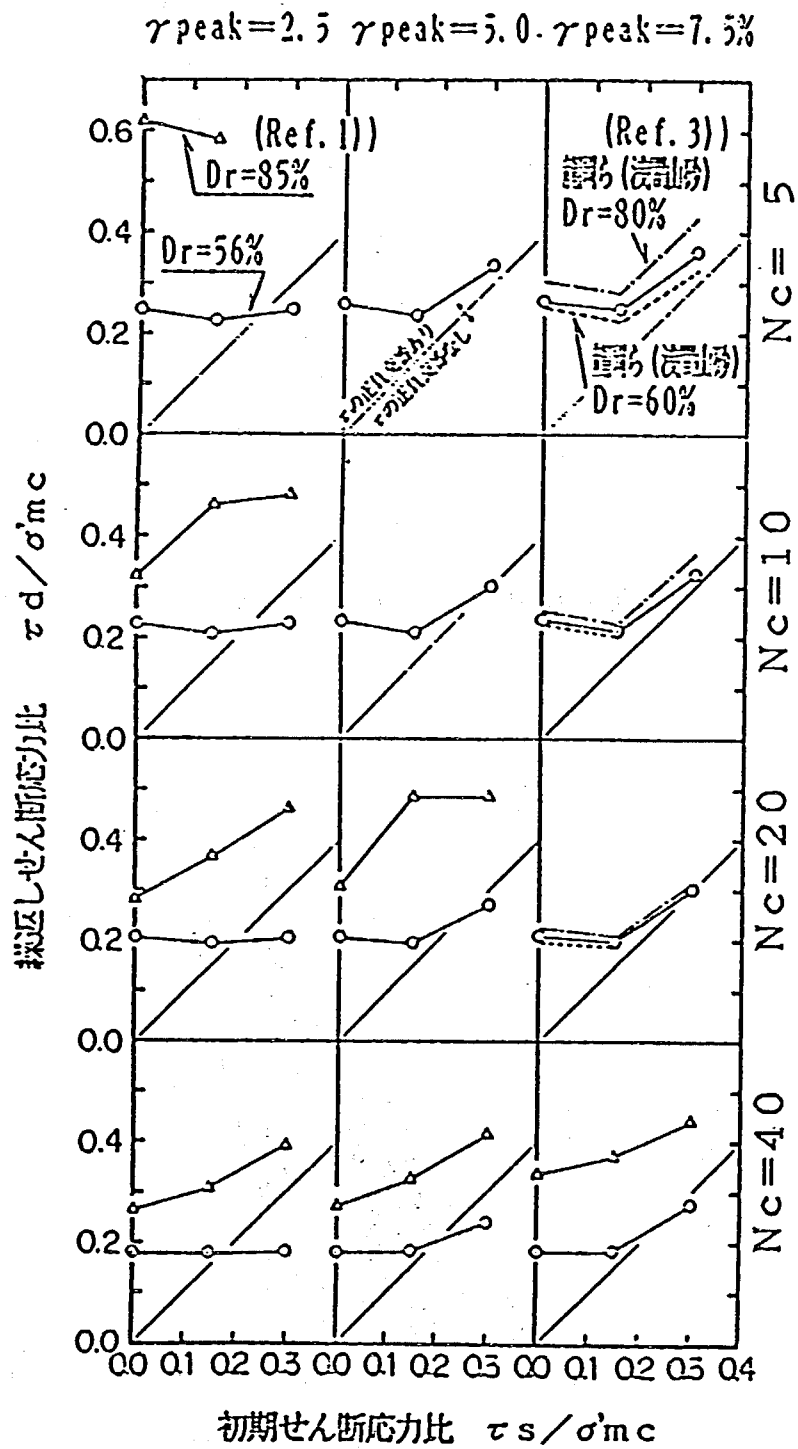
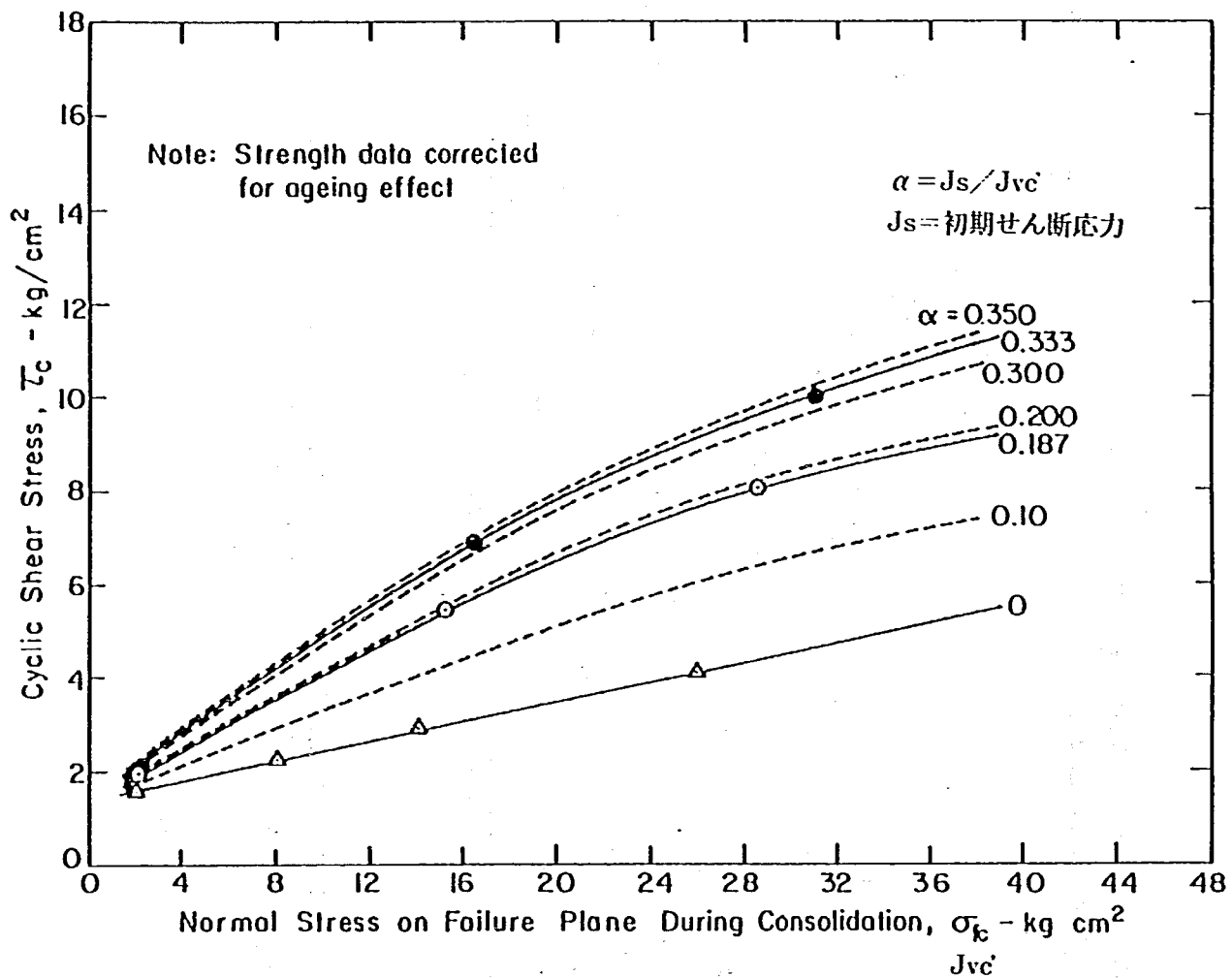
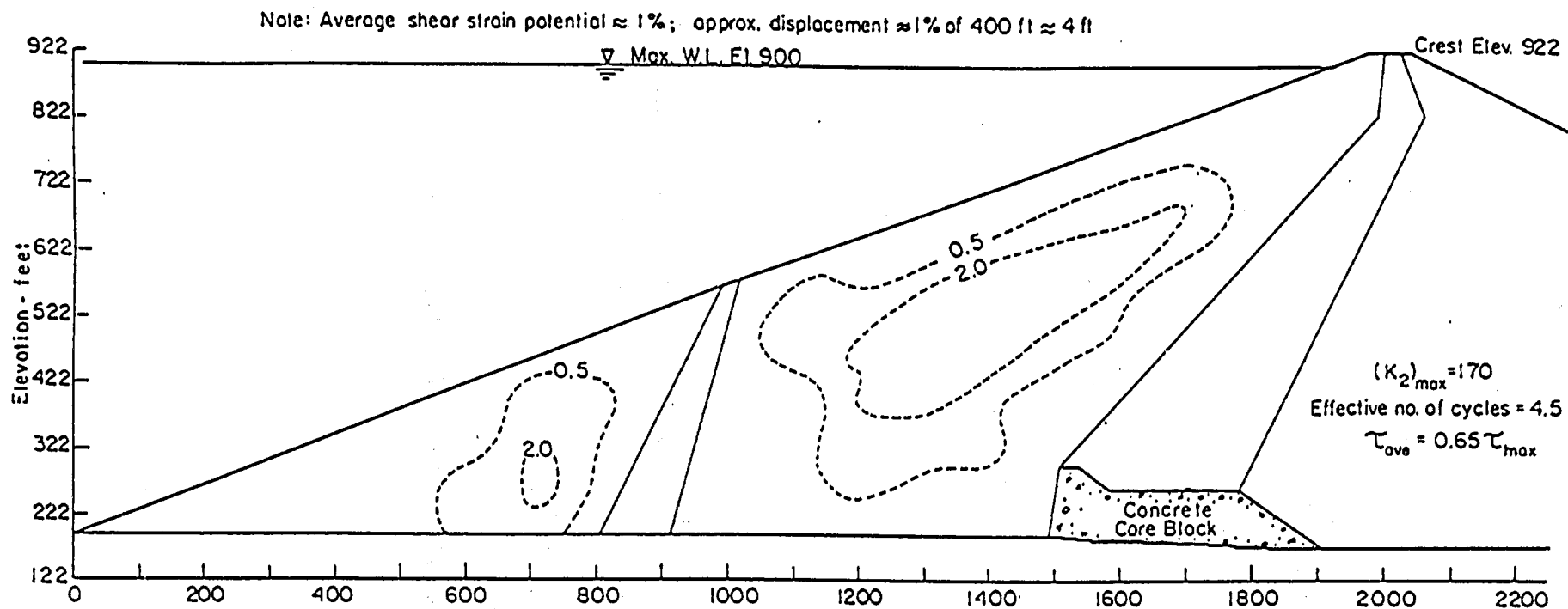


図44 液状化強度に及ぼす初期せん断応力の影響²⁴⁾



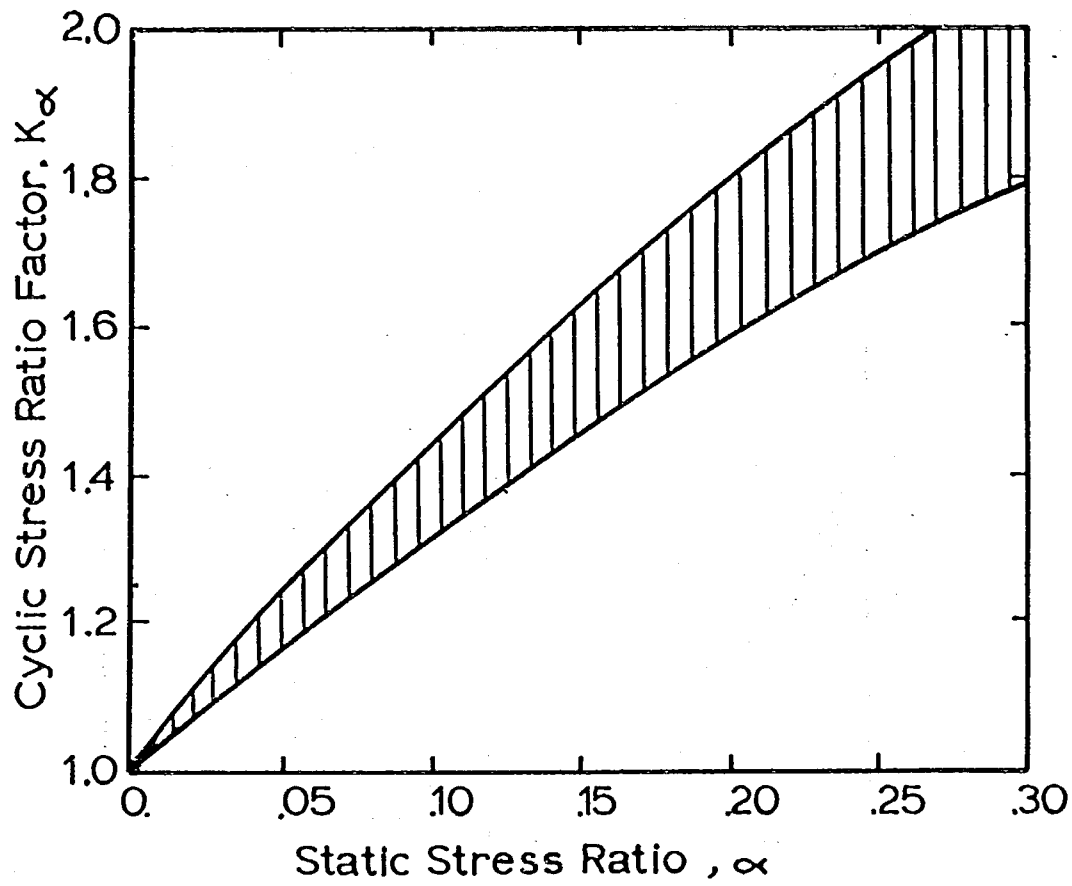
CYCLIC STRESS CONDITIONS CAUSING 2.5% RESIDUAL AXIAL STRAIN IN 6 CYCLES IN OROVILLE GRAVEL ($D_r \approx 84\%$)

図45 初期せん断応力を変えた液状化試験結果¹³⁾



CONTOURS OF STRAIN POTENTIAL CORRECTED FOR AGEING EFFECT FOR EARTHQUAKE
MAGNITUDE 6-1/2 ($a_{\max} = 0.60g$) (PLANE STRAIN ANALYSIS)

図46 初期せん断応力を考慮した地震時変形特性の評価例¹³⁾



Static Stress Ratio, $\alpha = \frac{\tau_h}{\sigma_v'}$

$$\left(\frac{\tau_c}{\sigma_v'}\right)_L \text{ for } \alpha = \alpha \approx \left(\frac{\tau_c}{\sigma_v'}\right)_L \text{ for } \alpha = 0 \times K_\alpha$$

図47 初期せん断応力の影響に関する補正係数²⁵⁾

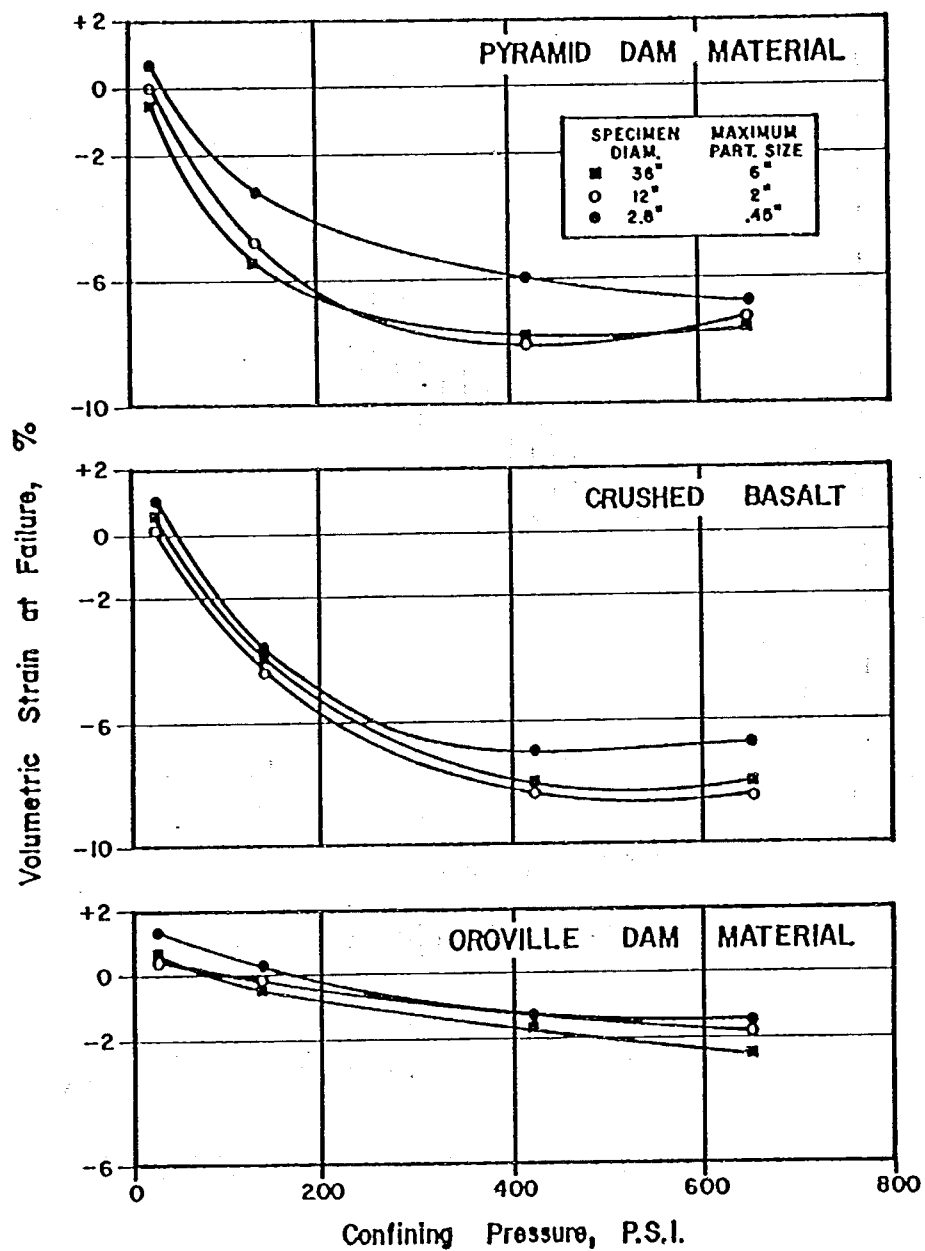


図48 拘束圧と破壊時の体積ひずみの関係²⁶⁾

吸水率

□ 0.001 - 0.499 × 2.0 - 3.999
 + 0.5 - 0.999 × 4.0 -
 × 1.0 - 1.999 ◇ 記入なし

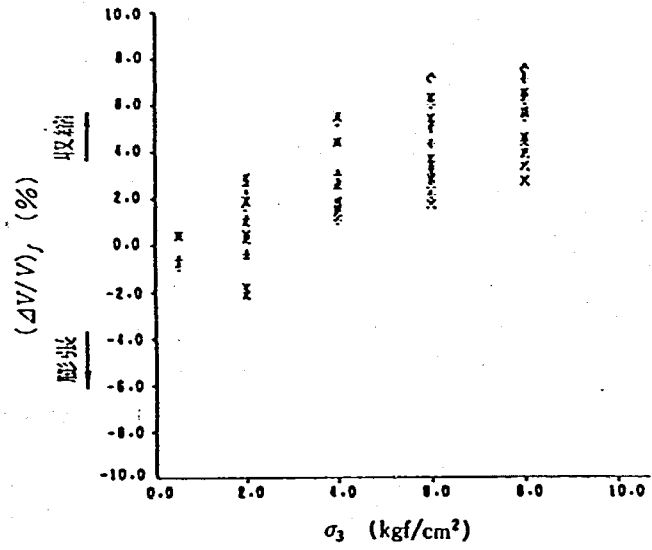
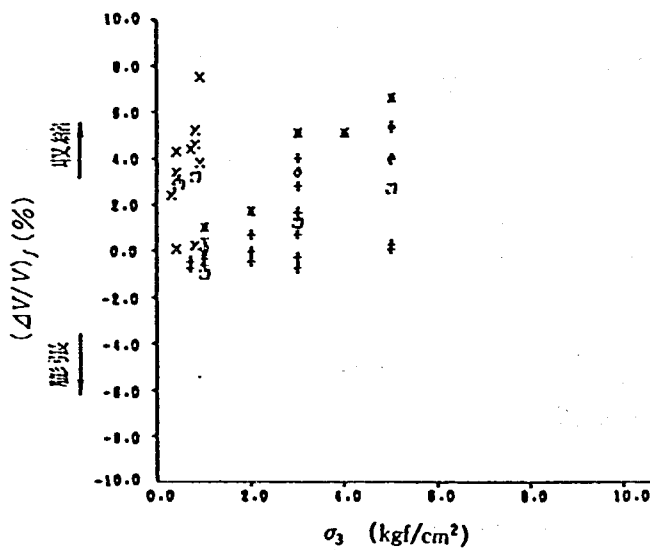
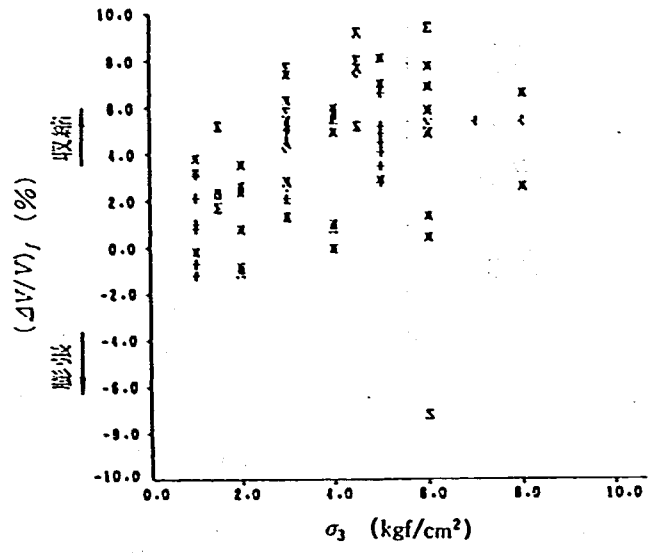
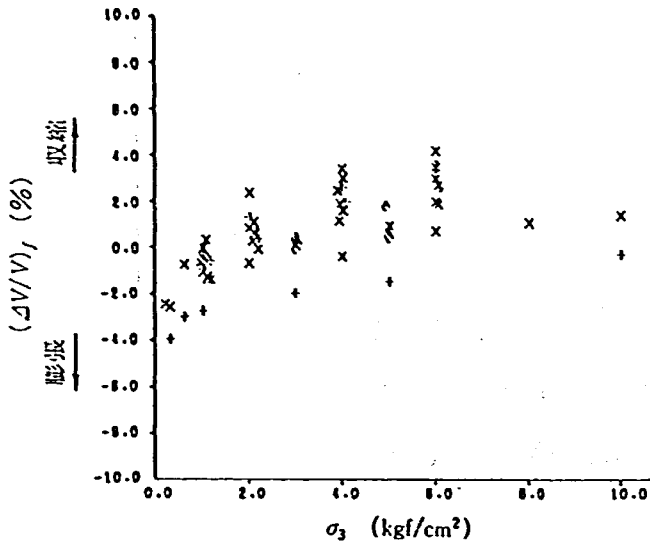


図49 拘束圧と破壊時の体積ひずみの関係²⁷⁾

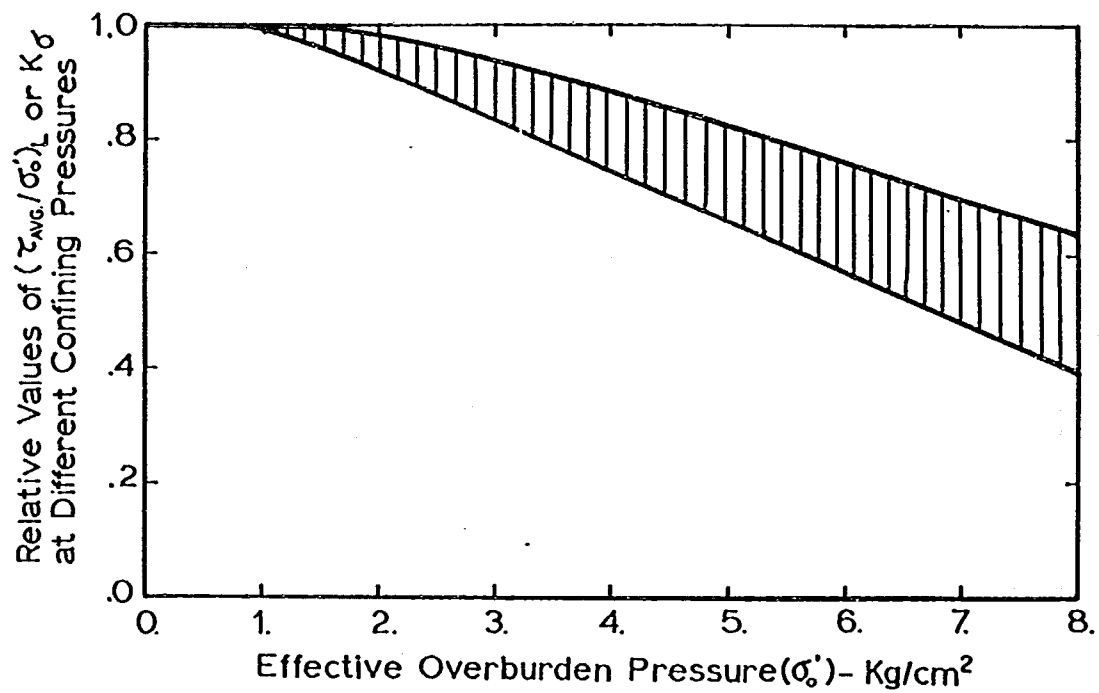
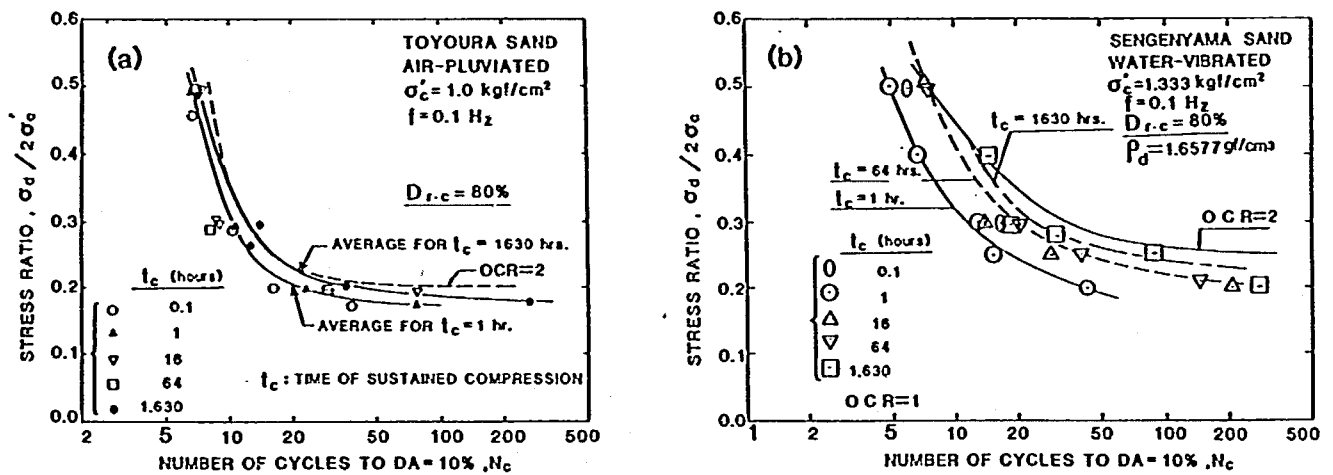
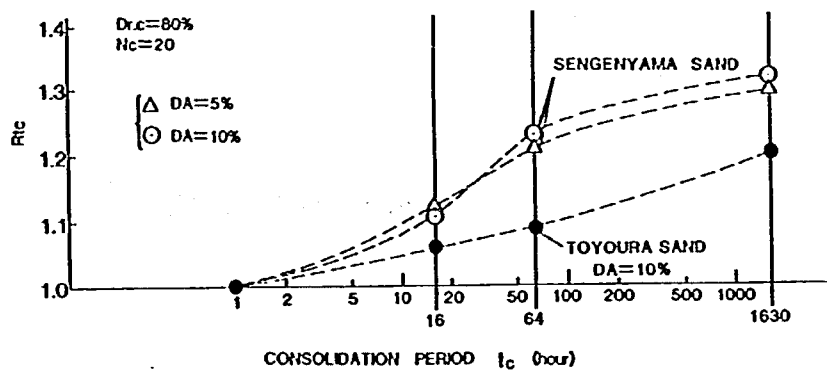


図50 拘束圧の影響に関する補正係数²⁵⁾



(1) 液状化強度曲線



(2) 強度増加率

図51 液状化強度に及ぼす圧密時間の影響²⁸⁾

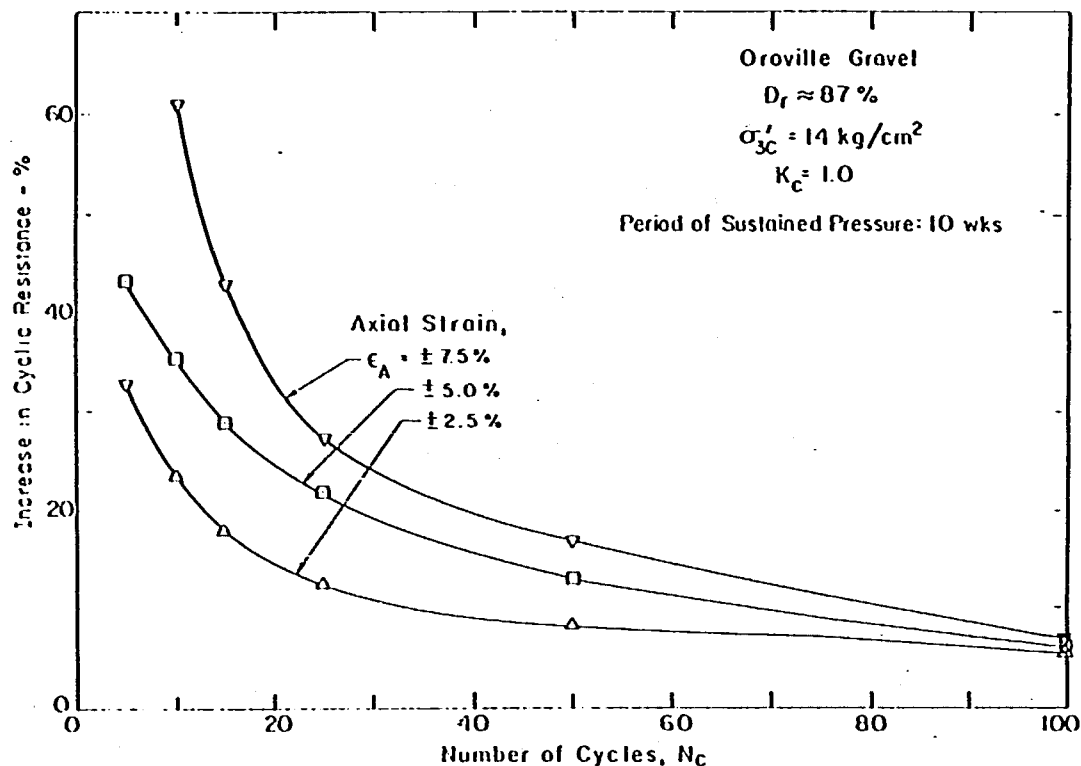
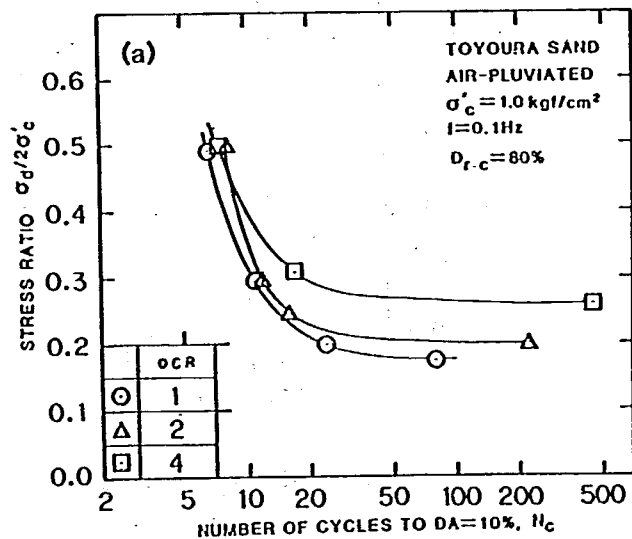


図52 液状化強度に及ぼす圧密時間の影響¹³⁾



(1) 液状化強度曲線

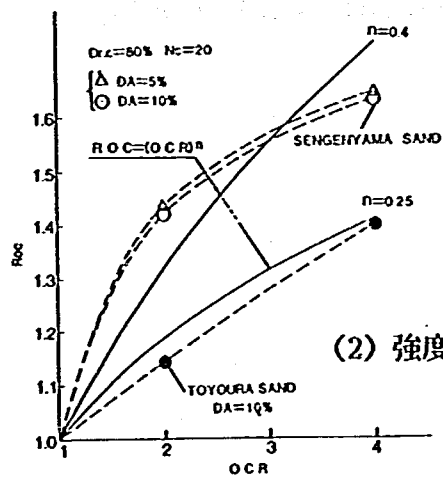
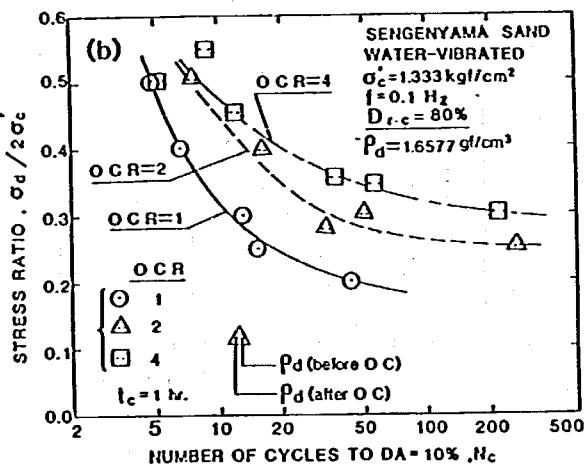


図53 液状化強度に及ぼす過圧密比の影響²⁸⁾

(2) 強度増加率

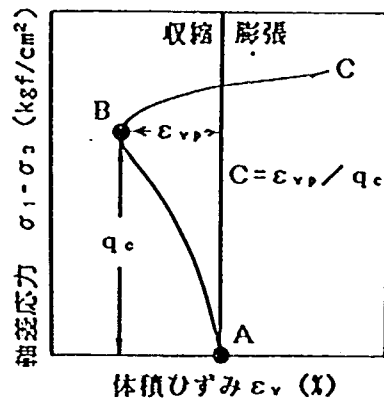
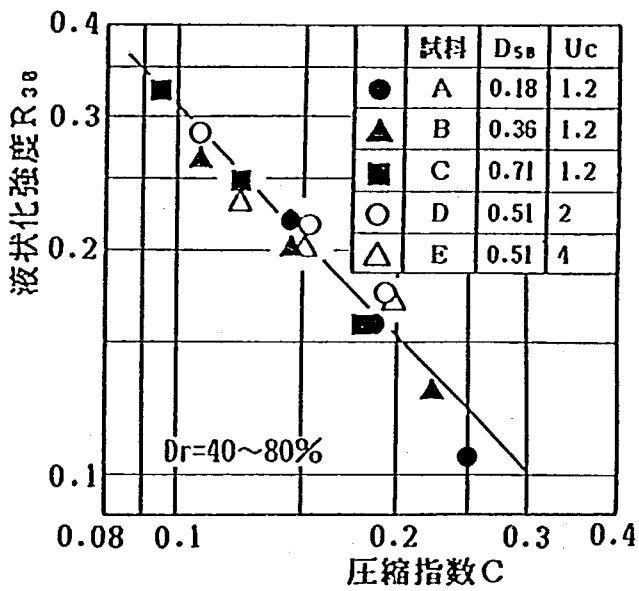
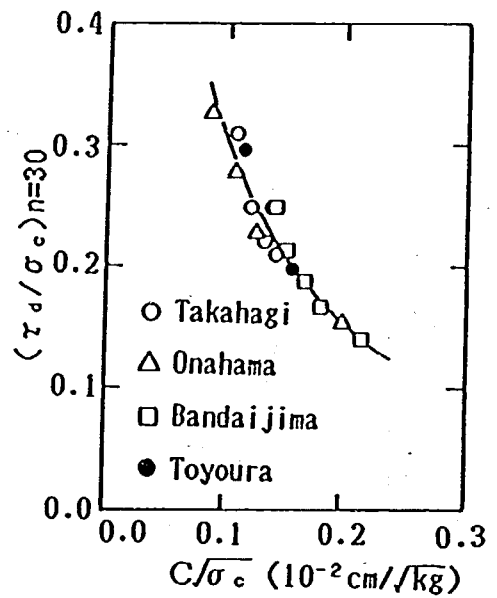


図54 静的排水試験における最大収縮点



(1) 拘束圧一定の場合³¹⁾



(2) 拘束圧が異なる場合³²⁾

図55 液状化強度と静的排水試験における収縮特性の関係

ISSN 0386-5878

粗粒材の動せん断強度に関する調査報告書 土木研究所資料第3065号
平成4年2月 (1992)

古賀 泰之
古関 潤一

要 旨

本資料は、フィルダムに用いられる粗粒材の動的せん断強度に関して、1990年までに発表されている文献と、動土質研究室の関連する研究成果をもとに検討したものである。粗粒材の液状化事例と室内試験結果、液状化特性に及ぼす諸要因影響、及び粗粒材の液状化強度の予測方法についてまとめた。

キーワード：粗粒材, 動的せん断強度, 要素試験, 大型三軸試験, フィルダム, 確



郵便はがき

41円切手
をはって
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

機械施工部動土質研究室

御中

№ _____

№ _____

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第3065号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏名

印

