

I S S N 0386—5878

土 研 資 料 第1788号

土 木 研 究 所 資 料

ロック材料の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験

昭和 57 年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所

ダム部フィルダム研究室

Copyright ©1982 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 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、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

ロック材料の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験

松 本 徳 久
渡 辺 和 夫
小 川 優

目 次

1. ま え が き	1
2. 試 験 目 的	1
3. 試 験 概 要	1
3.1 試験ケース	1
3.1.1 材 料	1
3.1.2 粒度分布	2
3.1.3 供試体初期密度	2
3.1.4 供試体寸法と試験粒度	4
3.2 供試体の作成方法	5
3.2.1 直径 30 cm × 高さ 60 cm 供試体	5
3.2.2 直径 50 cm × 高さ 100 cm 供試体	6
3.2.3 直径 120 cm × 高さ 240 cm 供試体	7
3.3 三軸圧縮試験方法	8
3.4 三軸圧縮試験機	9
4. 試 験 結 果	17
4.1 締固め予備試験	17
4.2 三軸圧縮試験	18
4.2.1 圧 密	18
4.2.2 応力ひずみ曲線	22
4.2.3 せん断強さ	44
4.3 粒子破碎調査	61
4.4 粒子形状調査	64
5. あ と が き	67

1. まえがき

我が国では、1960年代初期のころからダム高が100mを越す大規模なロックフィルダムが建設、計画されてきている。

ロックフィルダムの力学的安定性を分担するロックゾーンの体積は全堤体積の65～80%程度を占め大規模なダムでは500万 m^3 程度以上のロック材料が盛立てられる。

ロックゾーンの安定法面勾配はロック材料のせん断抵抗に大きく支配されるから、ロック材料の内部摩擦角はロック材料の所要量を決定する重要な設計値である。内部摩擦角は一般に試験時の応力状態が明確であり、比較的安定した結果が得られる大型三軸圧縮試験機が使用されている。しかし、ロック材料の三軸試験法は土質材料の場合¹⁾に比較して明確な試験方法が基準化されておらず、試験時の細部については試験実施機関によってまちまちの点が多い。

本報告書は、北陸地建三国川ダムのロック材料を用いて実施した三軸圧縮比較試験結果をとりまとめたものである。

ロック材料の三軸試験での第1の問題は、ロック材料の大粒径材料を含む実物材料をそのまま試験できないことにあるので、特に最大粒径に着目して試験している。三軸試験機は供試体直径30, 50, 120 cm と3種のものを使用した。本報告書を取りまとめるに当っては、試料作成方法や試験機の細部が結果に与える影響が大きいことから、試験の詳細をできるだけ記述し、資料集となるようにまとめた。

2. 試験目的

本試験は、ロックフィルダムのロック材料のせん断強度を室内三軸圧縮試験で精度よく求める上での諸課題のうち、特に以下の2点に着目して実施した。

- (1) 同一最大粒径、同一粒度材料を用いて供試体径の大小がせん断強度に与える影響を知る。
- (2) 相似粒度の材料を用いて粒径の大小がせん断強度に与える影響を知る。

3. 試験概要

3.1 試験ケース

3.1.1 材料

本比較試験に使用した材料は堅硬で粒子破碎の少ない材料である。三軸圧縮試験においてせん断中に粒子破碎が生じると現象がより複雑となることから、このように堅硬な材料を使うことによって本来の試験目的である最大粒径の影響が粒子破碎のしやすい材料を用いたときより明確に得られるはずである。

表-1に試験材料の性質を示す。

表-1 材 料 の 性 質

岩 種	班れい岩
真 比 重	2.97 ~ 3.10
絶 乾 比 重	2.89 ~ 3.08
表 乾 比 重	2.92 ~ 3.09
吸 水 量	0.2 ~ 1.0 %
強 度	$q_u = 1000 \sim 1500 \text{ kgf/cm}^2$
粒 子 形 状	Zingg の分類 ²⁾ によると板状, 塊状, 棒状と色々な形状で構成されている。
備 考	三国川ダムで使用予定のロック材料

3. 1. 2 粒度分布

試験粒度分布は表-2に示す最大粒径および均等係数条件を満たす相似粒度分布とした。均等係数が6という粒径範囲の比較的狭い粒度組成を選定した理由は最大粒径に応じた試験粒径範囲の相違を明瞭に与えてその影響の有無を求めようとしたためである。

表-2 粒度分布条件と最大粒径

粒 度 分 布	相 似 粒 度
均 等 係 数	$U_c = 6$
最 大 粒 径 d_{max}	9.52, 19.1, 38.1, 63.5, 101.6, 250mm

表-2に対応した粒径加積曲線を図-1に示す。

3. 1. 3 供試体初期密度

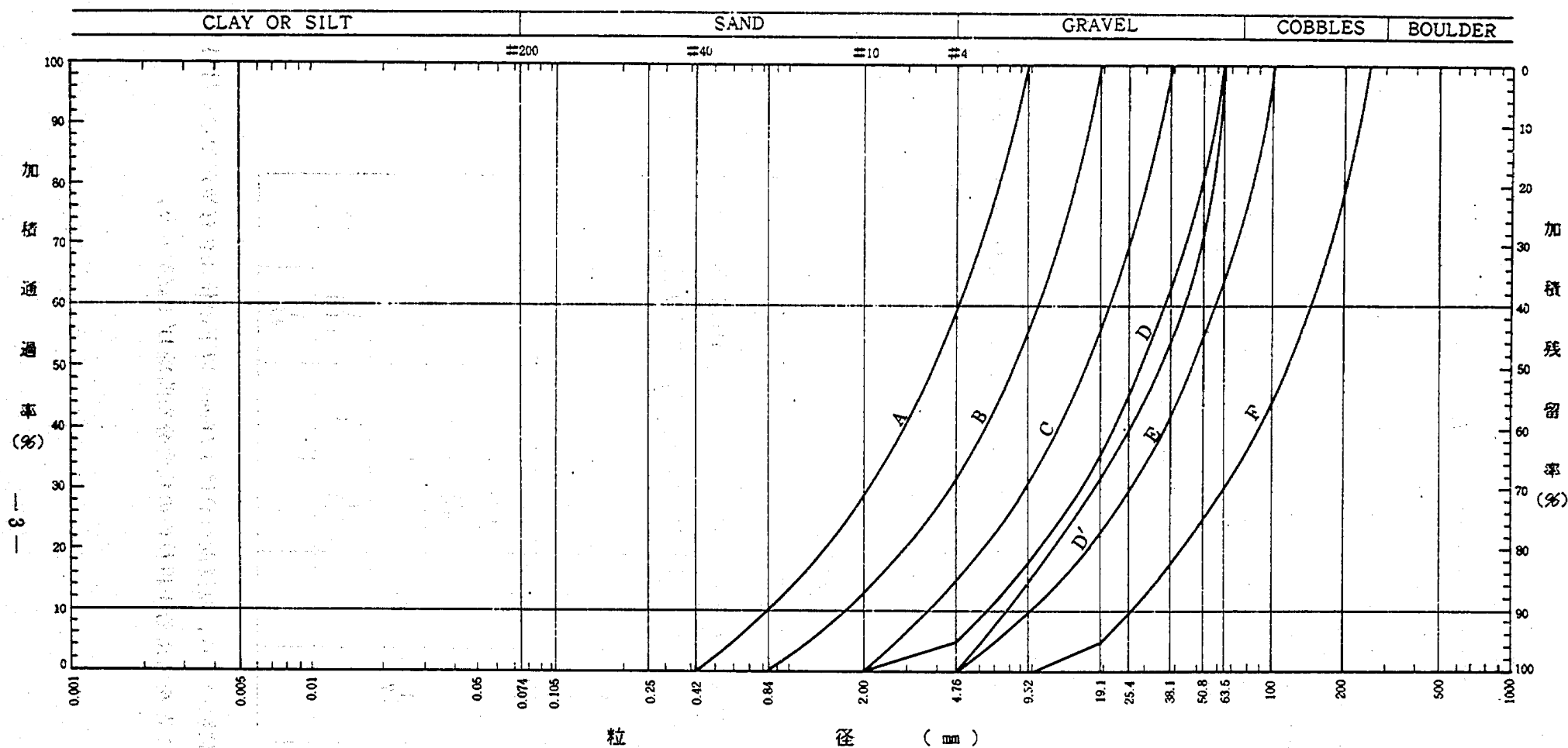
初期密度の設定を行う場合の考え方には、テルツァギーの定義による相対密度または単に密度を合せる場合の二通りがある。本試験では粗粒材料の相対密度試験方法が基準化されていないことと同一密度であれば強度定数が等しいという仮定の有効性を確めるために統一した密度で実施することとした。その際の統一した密度とは以下の定義による間隙比で0.45とした。

$$\text{間隙比}(e) = \frac{\gamma_w \cdot G_b}{\gamma_d} - 1.0 = 0.45$$

γ_w : 水の単位体積重量

G_b : 材料の平均絶乾比重

γ_d : 供試体の乾燥密度



粒 度	A	B	C	D	D'	E	F	粒 度	A	B	C	D	D'	E	F
最大粒徑 mm	9.52	19.1	38.1	63.5		101.6	250	D_{85} 粒徑 mm	8	17	34	52	57	88	210
最小粒徑 mm	0.42	0.84	2.0	2.0	4.76	4.76	9.52	均等係數 U_c	6	6	6	6	6	6	6
D_{10} 粒徑 mm	0.84	1.8	3.7	6.4	7.7	9.5	25.4	曲率係數 U'_c	1.0	1.1	1.1	1.2	1.0	1.1	1.0
D_{15} 粒徑 mm	1.1	2.2	4.7	8.5	9.5	15	35	比 重 (G_b)	2.980	2.980	2.980	3.015	2.980	3.015	3.015
D_{50} 粒徑 mm	3.9	8.4	17	29	37	48	110	吸 水 量 %	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
D_{60} 粒徑 mm	4.76	10.5	22	37	44	58	150	材 料 採 取 年	S.55	S.55	S.55	S.56	S.55	S.56	S.56

圖-1 試驗粒徑加積曲線

3.1.4 供試体寸法と試験粒度

本比較試験では、供試体直径(D)の異なる三種類の試験装置を使用した。

すなわち径 30cm, 50cm, 120cm で次の機関の所有である。

① 径 30cm, 高さ 60cm の三軸圧縮試験機 (D30)

建設省土木研究所フィルダム研究室。以下 D30 供試体, D30 試験とは、それぞれこの試験機による供試体, 試験を指す。

② 径 50cm, 高さ 100cm の三軸圧縮試験機 (D50)

日本技研株式会社技術研究所。以下 D50 供試体, D50 試験とは、それぞれこの試験機による供試体, 試験を指す。

③ 径 120cm, 高さ 240cm の三軸圧縮試験機 (D120)

フジタ工業株式会社技術研究所。以下 D120 供試体, D120 試験とは、それぞれこの試験機による供試体, 試験を指す。

各々の試験装置の詳細については後述する。

試験粒度の均等係数は前述のように 6 であるがそのときの最大粒径 (d_{max}) は (d_{max}/D) $< 1/5$ の範囲におさまるようにした。大型試験機を使用することから試験時間および予算的に限度があるため表-3 に示した試験ケースについて実施した。

表-3 供試体寸法と試験粒度

粒度 曲線	最大粒径 d_{max} (mm)	供 試 体 寸 法					
		D30×H60cm		D50×H100cm		D120×H240cm	
		d_{max}/D	試験の有無	d_{max}/D	試験の有無	d_{max}/D	試験の有無
A	9.52	$\frac{1}{31.5}$	○				
B	19.1	$\frac{1}{15.7}$	○				
C	38.1	$\frac{1}{7.9}$	○	$\frac{1}{13.1}$	○		
D	63.5			$\frac{1}{7.9}$	○		
D'	63.5	$\frac{1}{4.7}$	○				
E	101.6			$\frac{1}{4.9}$	○	$\frac{1}{11.8}$	○
F	250					$\frac{1}{4.8}$	○

尚, D30 供試体の試験のうち, 粒度曲線 D は 4.76mm 以下の粒径含有量が少なく材料の混合時に分離しやすいことを考え若干粗粒側の粒度分布曲線 D' で試験した。

3.2 供試体の作成方法

3.2.1 D30 供試体

図-2に示す振動締固め試験機を用いて振動数と加振時間を一定とし、加速度を変化させることによって目標とする密度に締固めて作成する。表-4に締固め仕様を示す。振動時には試料上面の乱れを防ぐために上面に 0.5 kgf/cm^2 程度の上載応力を与える。供試体作成の手順を以下に示す。

- ① 試料を試験粒度分布に従い粒径毎に必要量を計量する。
- ② ①によって計量されたものを各粒径毎に6等分した後、等分された各粒径を混合して試験粒度分布状態の試料を6個作成する。
- ③ ゴムスリーブおよびモールドを取り付けた底盤を振動テーブル上に固定する。
- ④ 締固め層数は6層とする。②で準備された試料を各層毎にハンドスコップで静かにモールド内にまき出した後に鉛直方向に加振し締固めを行う。このとき振動締固めの加速度は、予め行った締固め試験により得られた所定の密度を得られる加速度振幅を用いる。締固めは原則として振動を基本として行うが、密度調整のため静荷重を加える場合がある。
- ⑤ 締固め終了後、供試体上面にスチール板をのせてこれにスチール定規を立て、モールドカラー上面の基準面までの高さを5点測定し平均値を求める。供試体高さは予め測定してあるモールド底から基準面までの高さからこの平均値とスチール板の厚さを差し引き求める。
- ⑥ 供試体の上下端面において特別な処理を行なわないが、上端面においては表面の不陸を少なくする目的でハンドスコップ一杯分程度の細粒な試料を最後にまき出して締固める。

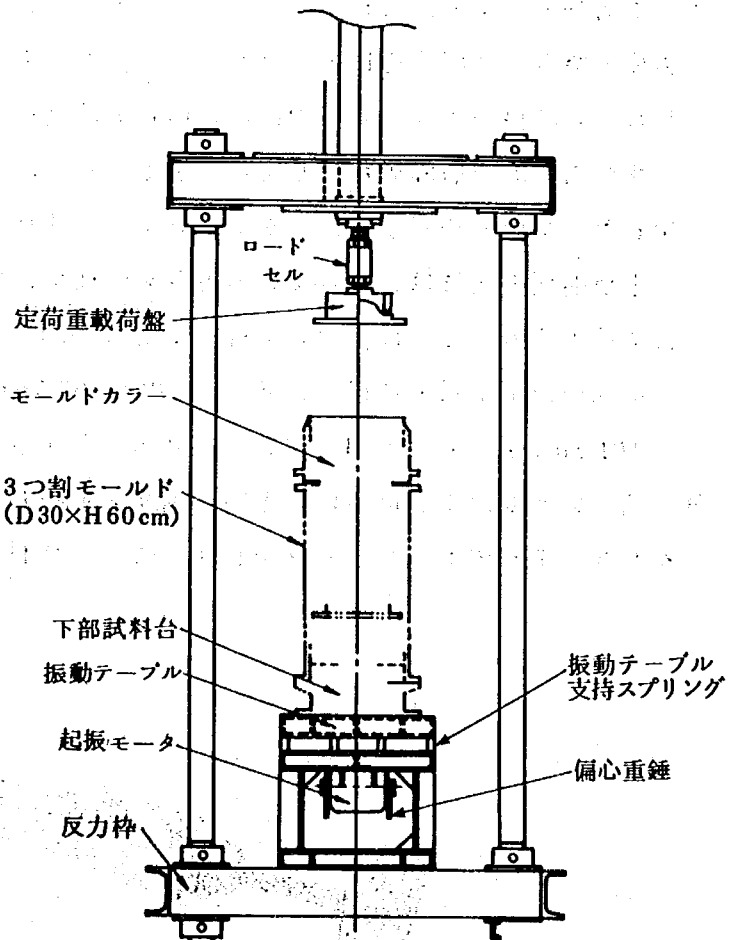


図-2 振動締固め試験機

表-4 締 固 め 仕 様

項 目	仕 様
振 動 数	30 Hz
振 動 時 間	480 sec/層
層 数	6 層 (1 層約 10 cm)
加 振 加 速 度	振動時の加速度は起振モーターの偏心重錘重量 (枚数) を変化することにより調整する。試験加速度は目標密度に応じて 0~4 g

3. 2. 2 D50 供試体

供試体の作成は密度規制で行い、5層に分けて締固める。次に作成の手順を述べる。

- ① 試料は供試体の 1/10 の体積に対して所定の密度に見合う重量および粒度に調整し、1層分とする。この時使用する秤は 1 g まで計測できるものとする。
- ② 下部加圧板にゴムスリーブを 1 枚、およびモールドをセットし (ゴムスリーブの肉厚 2.0mm, モールド内径 504mm) 下部加圧板のボラスメタルの上にもろ紙を敷く。
- ③ 最初の 1 層分の内先に少量 (約 15 kgf) モールドに入れ下部端面が均等な平面になるよう突棒でならす。
- ④ 1 層分モールドに入れた後、粒度が片よらないよう突棒で突く、その後もう 1 層分入れ突棒で突き、2 層分を振動ランマーにて、所定の密度になるようスケールにて高さを測定しながら試料の表面より締固める。締固め時間は約 3 分 / 層である。

また締固めの層間のなじみを良くするため締固め後の表面をよくかき乱す。図-3 に使用したランマーを示す。表-5 はランマーの仕様である。

- ⑤ 上部端面の成形は、 $\phi 50$ cm の円板を端面にあて、所定の高さとなるまで振動ランマーにて締固める。その後、同じ試料を使用し、端面の凸凹をならす。

端面成形用試料の粒径は、 $d_{\max} = 38.1, 63.5$ mm については $d = 2.00 \sim 4.76$ mm, $d_{\max} = 101.6$ mm については $d = 4.76 \sim 9.52$ mm とする。

- ⑥ 所定の密度および高さに締固め、端面成形をした供試体上面にもろ紙を敷き、上部加圧板を載せ、それにゴムスリーブをわゴムにて締め付ける。

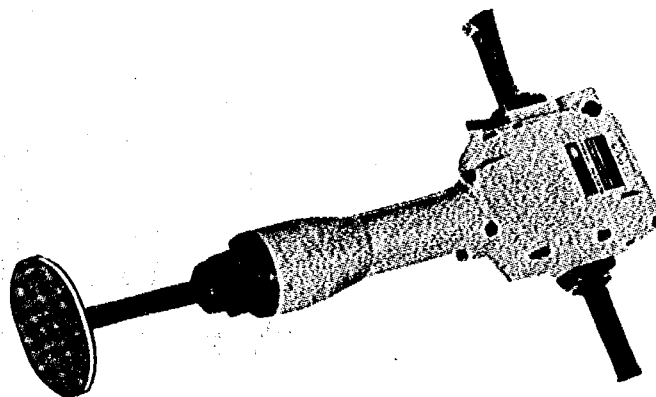


図-3 振動ランマー外観

表-5 ランマー仕様

全負荷打撃数	95 打撃 / 分
本体重量	33 kgf
加圧盤直径	20 cm

3.2.3 D120供試体

供試体作成の手順は次の通りである。

- ① 底盤、ゴムスリーブ、モールドを供試体作成用ピットにセットする。
- ② 底盤に試料を直接、接触させないため、また試料層と底盤間に空隙の発生を防ぐために、試験材料の細粒分 (D_{50} の10%以下, 4.76mm~2.0mm) を D_{10} の1/2 以下程度の厚さに敷均し、充分転圧する。
- ③ 粒度階毎にストックしてある材料を、配合粒度に従い計量する。
- ④ 計量した材料をよく攪拌し、①でセットしたモールドの中に静かに撒き出す。
- ⑤ 層厚を測定するため、層表面を静かに均して、モールド天端にガイドを置き、17点の高さをレベルで測定する。
- ⑥ 締固め試験で得られた $e = 0.45$ に対応する締固め時間より、若干、少ない時間、すなわち5分間、試料の表面より振動締固めを行なう。図-4 に締固め機械を示す。表-6 はこの機械の仕様である。
- ⑦ 層表面の高さを測定し、密度の算定を行なう。ここで所定の密度に達していなければ、微調整の締固めを行なう。
- ⑧ 所定の密度に達したら、層と層の境をなくすために、層表面をほぐす。



図-4 振動締固め機の外観

⑨ ③～⑧の手順を繰り返す。最上層の完成後、その表面の不陸をなくすために、細粒分(4.76～2.0mm)を敷均し、載荷キャップを取付ける。

⑩ 締固め層数は $d_{\max}=101.6\text{mm}$ の場合は 8 層、 $d_{\max}=250\text{mm}$ の場合は 6 層とした。

表－6 振動締固め機仕様

重 量	533 kgf
振 動 板	1140 mm ϕ
振動モーター型式	KM40-4P 2 個
遠 心 力	モーター 1 個あたり 800 kg 重
振 動 数	1450 R・P・M
振 動 振 幅	平均 3.20 mm

3.3 三軸圧縮試験方法

D30、D50、D120 の試験方法は表－7 のとおりである。

表－7 試 験 方 法

供試体の状態	不飽和状態 ($w < 1\%$)
排水条件	圧密排水試験
せん断方法	側圧一定軸方向変位制御法

表－8 に試験方法の詳細を示す。

表－8 試験方法の詳細

項目 \ 供試体	D30	D50	D120
試験側圧 (kgf/cm ²)	1.5, 3, 4.5, 6	2, 4, 6	2, 4, 6
軸方向変位速度 (mm/min)	6 ($\pm 1\%/min$)	3.3 ($\pm 0.33\%/min$)	3.3 ($\pm 0.14\%/min$)
圧密方法	試験側圧まで 1 kgf/cm ² /min の速度で増圧し、試験側圧を保つ	手動で試験側圧まで増圧する。約 1 min の所要時間	試験側圧まで 1, 2, 4, 6 kgf/cm ² のステップで段階的に行う。各ステップ間の増圧速度は 0.1 kgf/cm ² /min
圧密完了基準	体積変化が零または供試体体積の 0.05%/min 以下の状態	体積変化が供試体体積の 0.05%/min 以下の状態	各ステップで体積変化が零、供試体体積の 0.05%/min あるいはステップ継続時間が 8 時間を越えた場合

3.4 三軸圧縮試験機

使用した各三軸圧縮試験機の概要を表-9に示す。

表 9 - 1 三軸圧縮試験機の概要

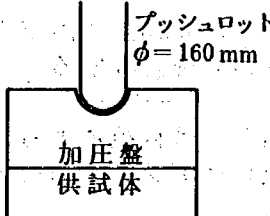
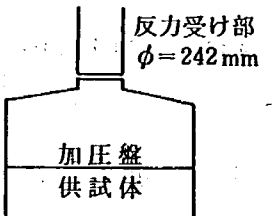
試験機 項目	D 3 0	D 5 0	D 1 2 0
三 軸 容 器	1 室 式	1 室 式	1 室 式
軸 載 荷 方 法	供試体下部より上方に 載荷	供試体上部より下方に 載荷	供試体下部より上方に 載荷
上下加圧盤の形状	供試体直径と同寸法 の円形	供試体直径と同寸法 の円形	供試体直径と同寸法 の円形
上 部 加 圧 盤 の 回 転 の 有 無	回 転 可 能	回 転 可 能	回 転 可 能
上部加圧盤とプッ シュロッドまたは 反力受け部の関係	分離型（球面）  プッシュロッド $\phi=160\text{mm}$ 加圧盤 供試体	分離型（球面） 左 に 同 じ ロッド $\phi=120\text{mm}$	分離型（平面）  反力受け部 $\phi=242\text{mm}$ 加圧盤 供試体
上下加圧盤の排水 方法	ポーラスメタル	ポーラスメタル	有孔盤（ $\phi 5\text{mm}$, 2cm 千鳥）
ゴムスリーブ	1.5 mm/枚×2枚	1 mm/枚×4枚	10 mm/枚×1枚 （布入り）
軸方向荷重の測定	供試体上部反力を三軸 室の外部で測定	左 に 同 じ	供試体上部反力を三軸 室の内部で測定
側圧の加圧方法	油圧を水圧に変換 （油圧サーボ方式）	空気圧を水圧に変換 （空気圧の調圧弁方式）	油圧を水圧に変換 （ノルウェー型恒圧装置）

表 - 9 - 2 三軸圧縮試験機の概要

試験機 項目	D 3 0	D 5 0	D 1 2 0
軸 載 荷 方 式	油圧シリンダーによる 方式(油圧サーボ方式)	左 に 同 じ	左 に 同 じ
軸方向変位の測定	軸载荷用油圧シリンダー の変位量を測定	〃	〃
体 積 変 化 の 測 定	外体積変化量(三軸室内 の水の出入量)	〃	〃
体積変化の測定方式	加圧用シリンダーの変位 測定	ビューレット管方式	〃
载荷用ピストンの 貫入量補正 (見掛の体積)	機械的に補正する	左 に 同 じ	〃
試 験 機 制 御	設 定 器	設 定 器	マイクロコンピューター
試験時の測定間隔	ペンレコーダによる連続 測定	軸ひずみ 0.25%間隔で 各々の値を読み取る	3分間に1回測定値を プリントアウトする
測 定 値	レコーダから読み取る	体積変化は目視による 荷重値はデジタル値を 読む	マイクロコンピューター により数値化している
測 定 項 目 お よ び 測 定 順 序	同時測定 { 軸 荷 重 軸 変 位 体 積 変 化 側 圧	① 側 圧 ② 軸 変 位 ③ 軸 荷 重 ④ 体 積 変 化	① 側 圧 ② 軸 荷 重 ③ 体 積 変 化 ④ 軸 変 位

試験時の測定精度を表-10に示す。

表-10 試験時の測定精度

試験機	測定項目	容量	検出器の方式	最小読み取り量
D30	軸荷重	50 トン	ヒズミゲージ・ホイストンブリッジ	0.2 トン
	側圧	30 kgf/cm ²	〃	0.1 kgf/cm ²
	軸変位	15 cm	ポテンショメータ	0.5 mm
	体積変化	10,000cm ³	加圧シリンダーの変位測定ポテンショメータ	40 cm ³
D50	軸荷重	60 トン	ヒズミゲージ・ホイストンブリッジ	0.2 トン
	側圧	30 kgf/cm ²	0.25kgf/cm ² 級ブルドン管	0.25 kgf/cm ²
	軸変位	25 cm	ポテンショメータ	0.5 mm
	体積変化	9,400cm ³	ビューレット管直視式	60 cm ³
D120	軸荷重	700 トン	ヒズミゲージ・ホイストンブリッジ	3.4 トン
	側圧	50 kgf/cm ²	ブルドン管	1 kgf/cm ²
	軸変位	60 cm	光電式インクリメンタル方式のリニアエンコーダ	0.005 mm
	体積変化	無制限 (切替)	赤外線による光電管方式およびリニアエンコーダ	1.06 cm ³

試験装置の概略図と配管系統図を図-5から図-9に示す。

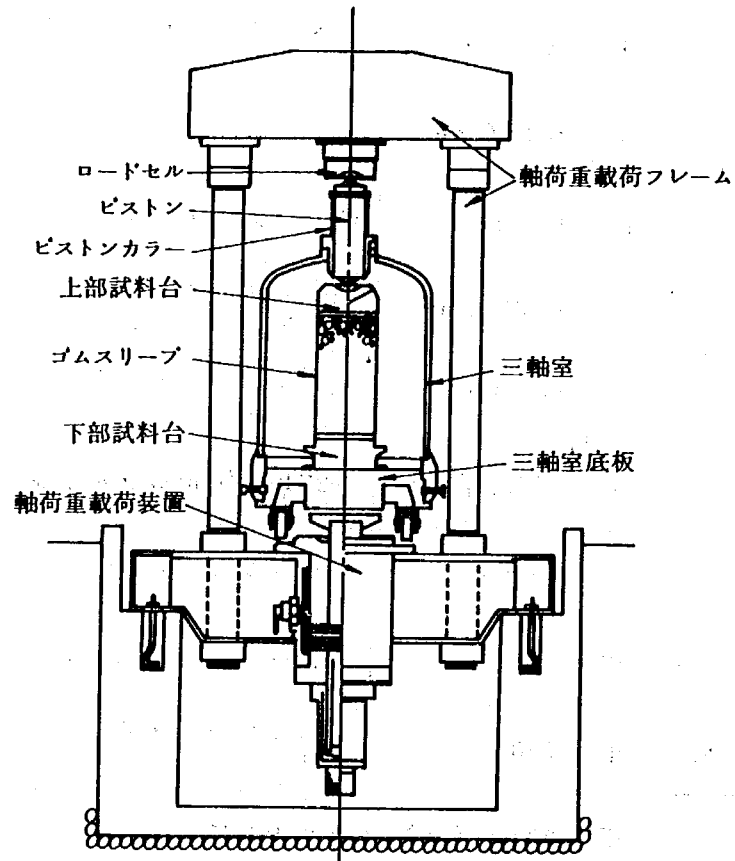


図-5 D30の三軸圧縮試験機

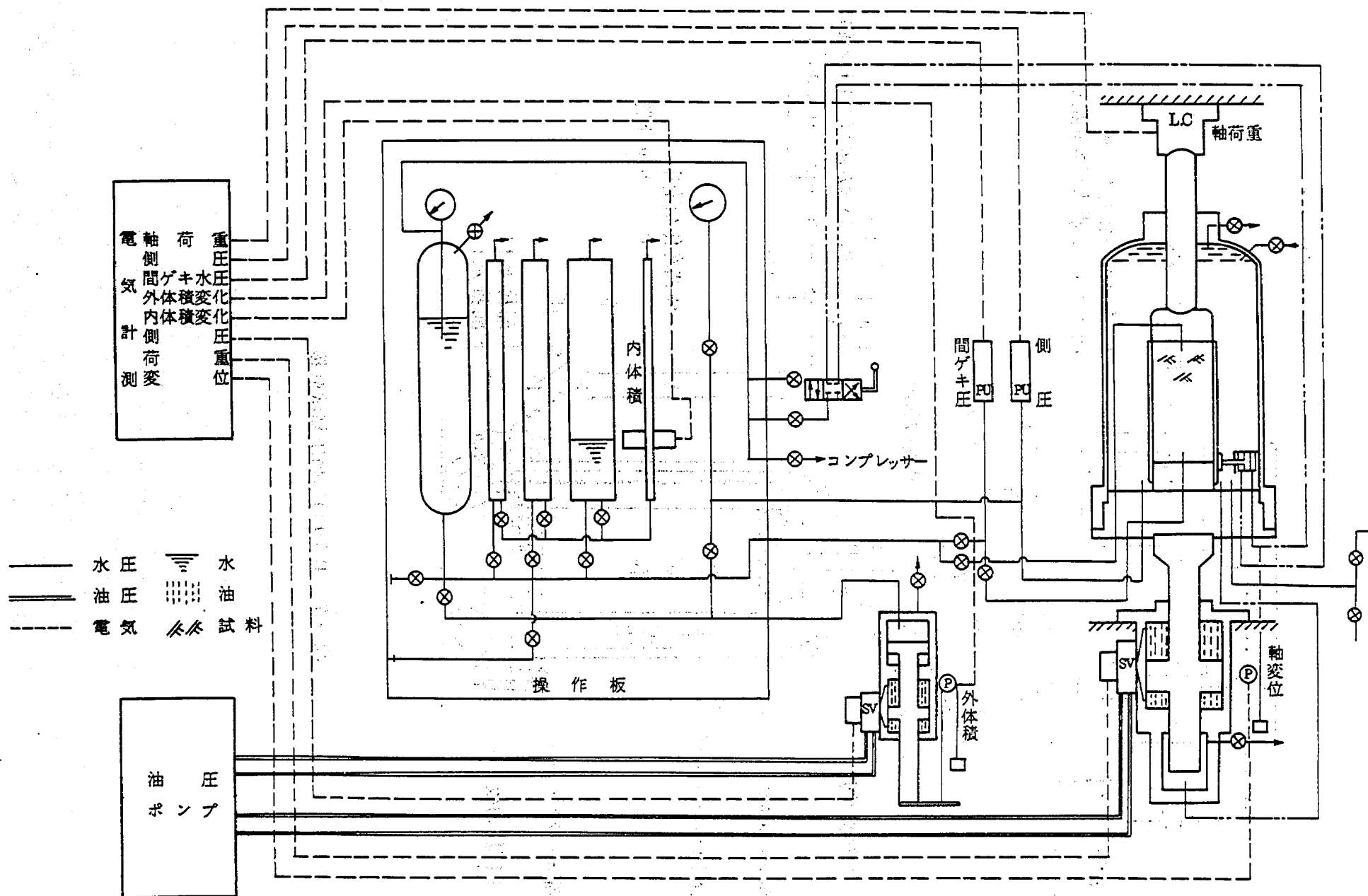


図-6 D30の配管系統図

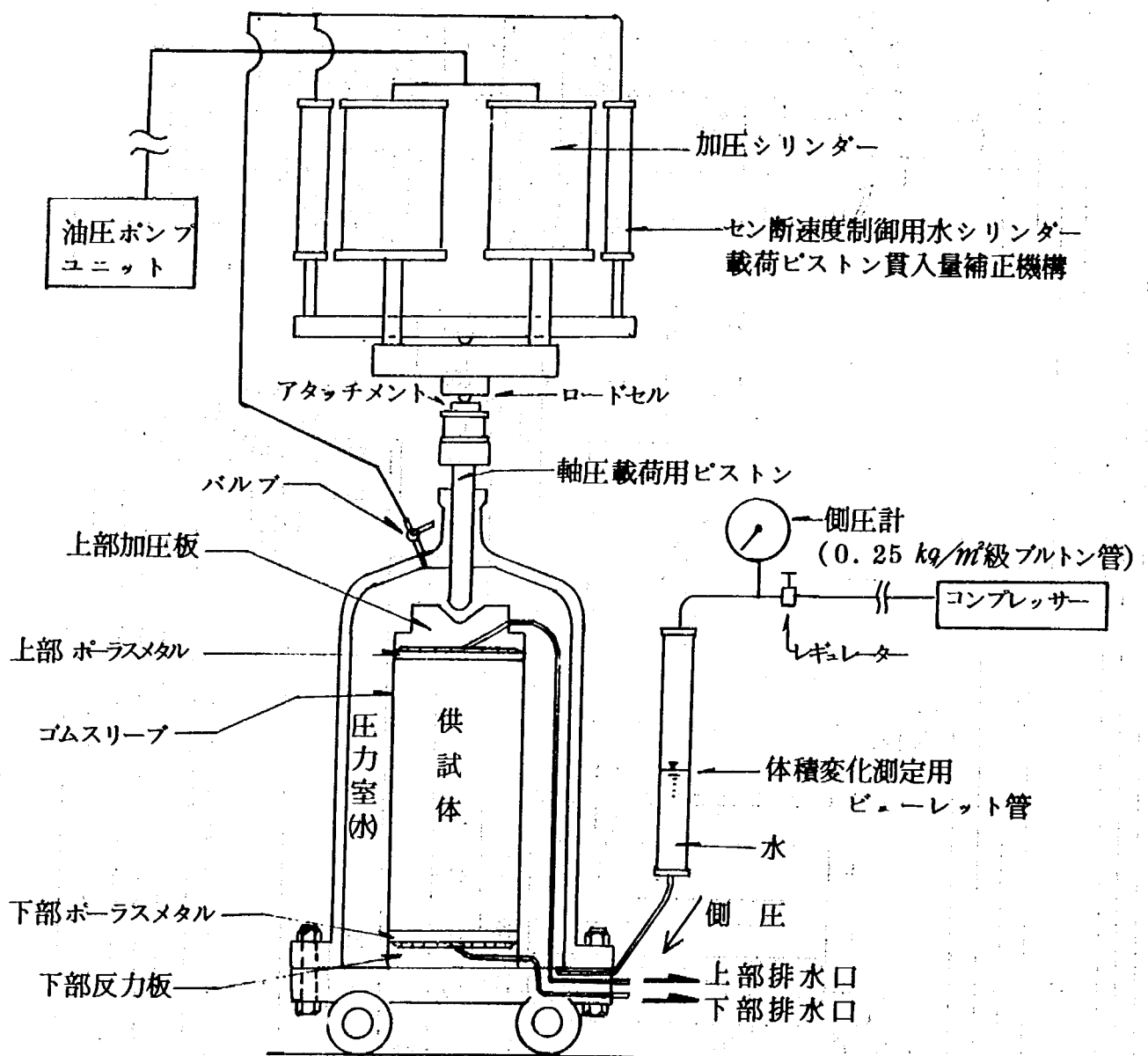


図-7 D50の三軸圧縮試験機

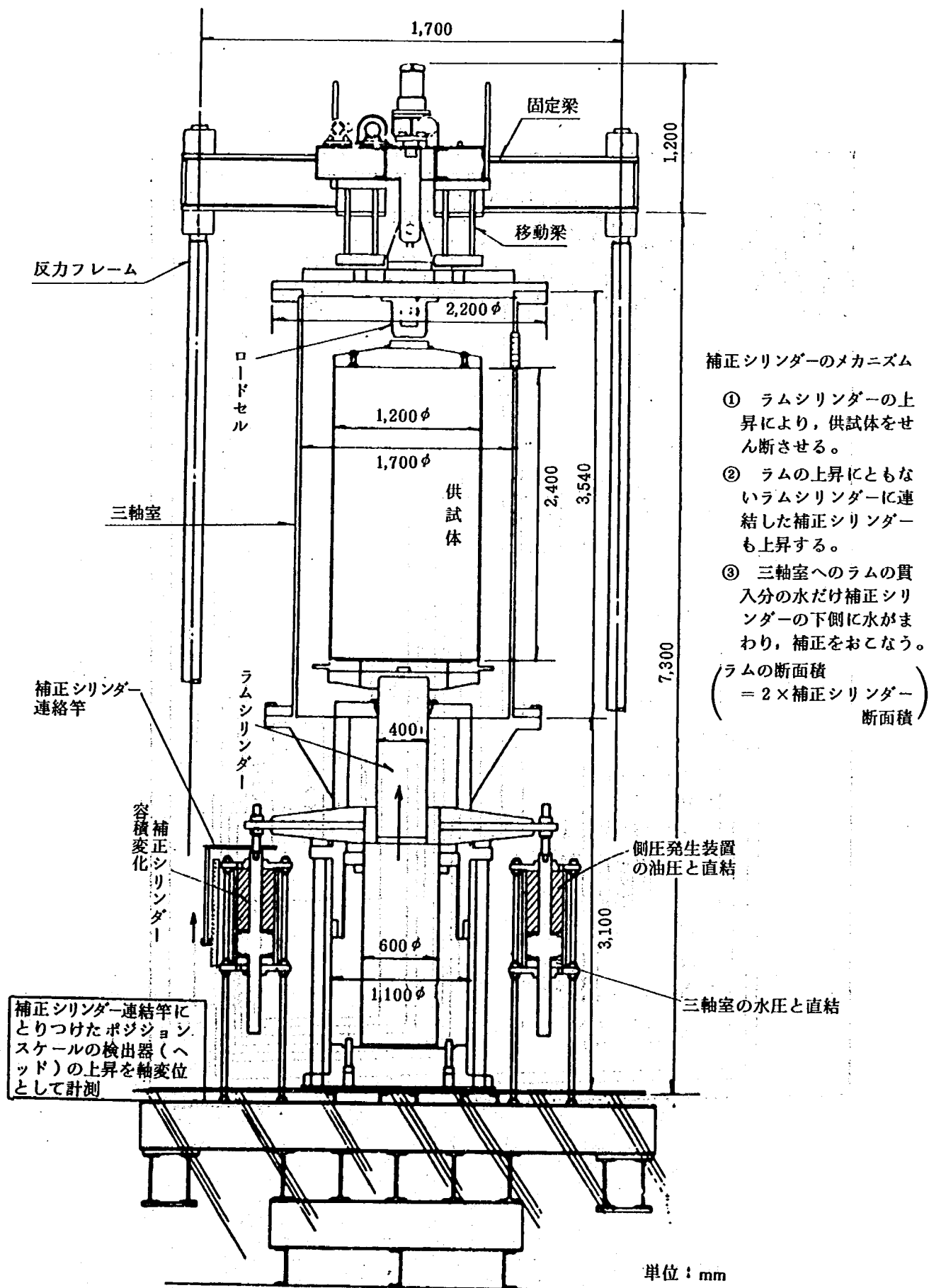


図-8 D120の三軸圧縮試験機

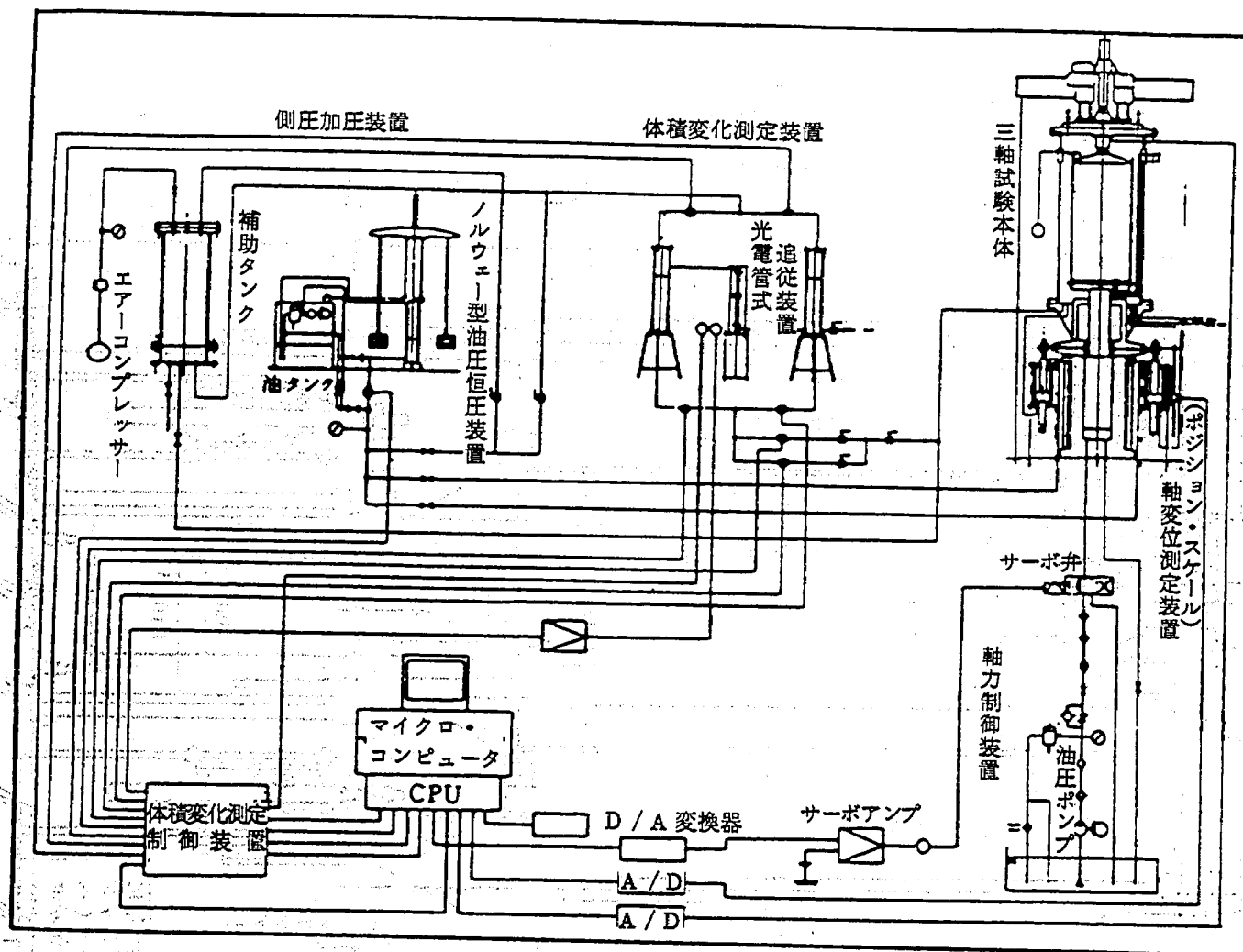


図-9 D120の配管系統図

4. 試験結果

4.1 締固め予備試験

初期間隙比が 0.45 の供試体を作成するための締固めエネルギーを求めるために D 30, D 50 および D 120 の各々について「3.2 供試体の作成方法」の方法により締固め予備試験を実施した。いずれの方式も加振により締固めている。図-10 に加振時間と密度の関係を示す。D 30 の場合は締固め時間が約 2 ~ 4 分程度で一定の空隙比となる。D 50 の場合は締固め時間とともに空隙比が低下する傾向にある。また D 120 の場合では締固め時間が 8 分程度で一定の空隙比となる。

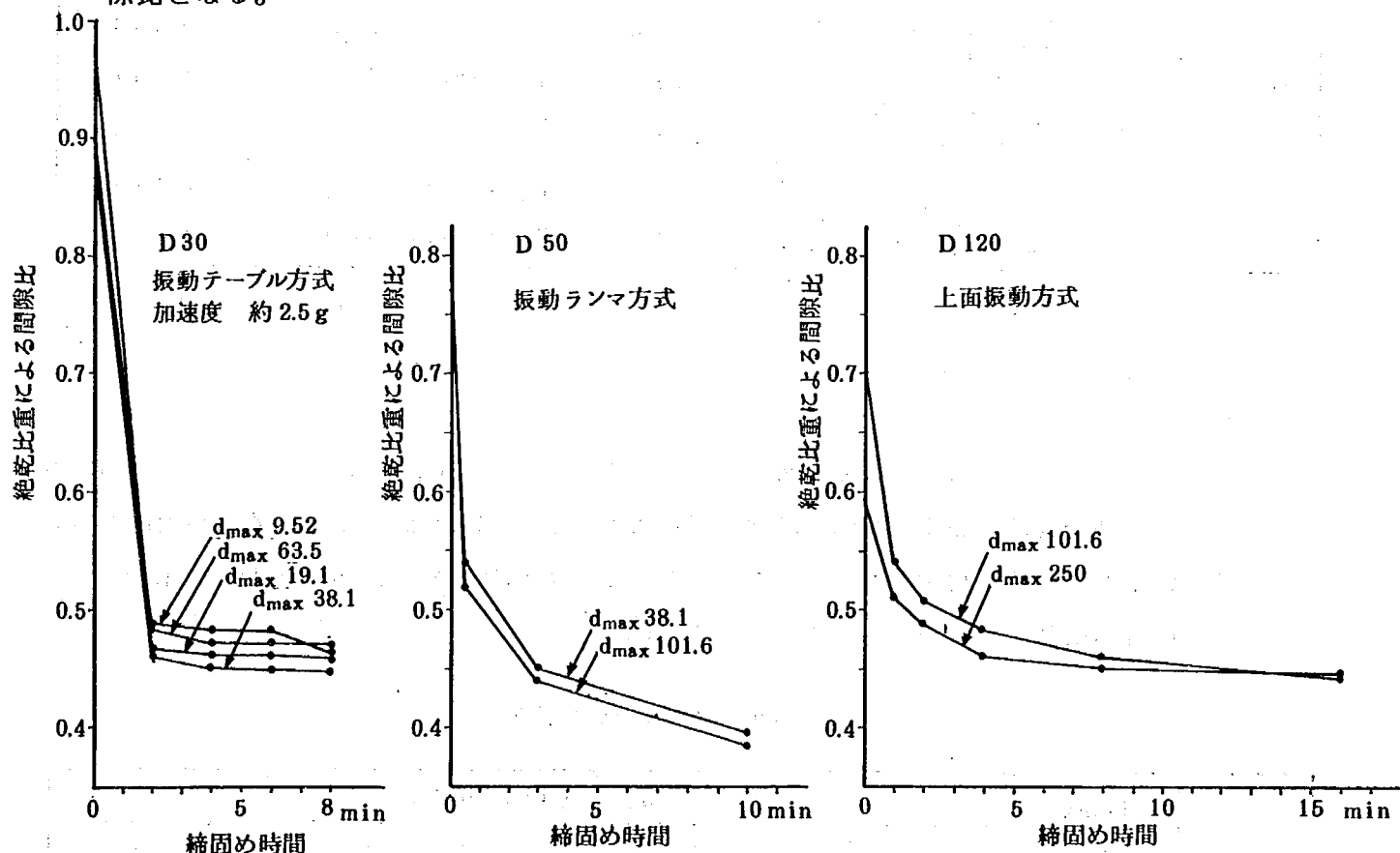


図-10 締固まり特性の比較

締固め予備試験で求められた最大空隙比と最小空隙比の値を表-11 に示す。

最大空隙比を求める方法は D 30, D 50 および D 120 の 3 者ともほとんど同じであるが, D 120 がやや小さめの最大空隙比を与えている。最小空隙比については締固めに用いた機械および方法が 3 者で異なり, 得られた最小空隙比も異なる。

表-11 最大間隙比と最小間隙比

供試体	d _{max} (mm)	最大間隙比		最小間隙比	
		方 法	e _{max}	方 法	e _{min}
D 30	9.52	モールド内に試料をハンドスコップで静かに投入して得られた間隙比	0.796	振動締固め時の試料に約4gの加速度を与えて8分/層で6層に締固めて得られた間隙比	0.445
	19.1		0.794		0.421
	38.1		0.802		0.410
	63.5		0.862		0.443
D 50	38.1	試料を静かにモールド内に詰めた時に得られた間隙比 (φ38.1cm×h40cmモールド)	0.770	1層の締固めによって密度が増加しなくなった時の間隙比	0.396
	63.5		0.783		0.391
	101.6		0.803		0.384
D 120	101.6	試料をモールド内に静かにまき出した時に得られた間隙比	0.687	64分/層で3層に締固めて得られた間隙比	0.413
	250		0.627		0.412

4.2 三軸圧縮試験

4.2.1 圧 密

圧密経過時間と圧密体積ひずみの関係を図-11~13に示す。圧密に要した時間は、D 30で10~20分程度、D 50で60分程度、D 120では3~14時間程度である。所要時間はほぼ供試体の体積量に比例した結果となっている。圧密体積ひずみは側圧とともに増加している。圧密体積ひずみは表-12のとおりである。

表-12 圧密体積ひずみ

供試体	d _{max} (mm)	σ _s (kgf/cm ²)					
		1.5	2.0	3.0	4.0	4.5	6
D 30	9.52	1.9 %	— %	3.5 %	— %	4.2 %	5.0 %
	19.1	2.5	—	2.8	—	4.4	5.4
	38.1	2.6	—	4.4	—	4.7	6.1
	63.5	4.3	—	5.5	—	7.1	6.9
D 50	38.1	—	0.9	—	1.0	—	1.6
	63.5	—	0.6	—	1.1	—	1.9
	101.6	—	0.7	—	1.0	—	1.5
D 120	101.6	—	1.0	—	1.6	—	1.9
	250	—	1.2	—	2.1	—	3.7

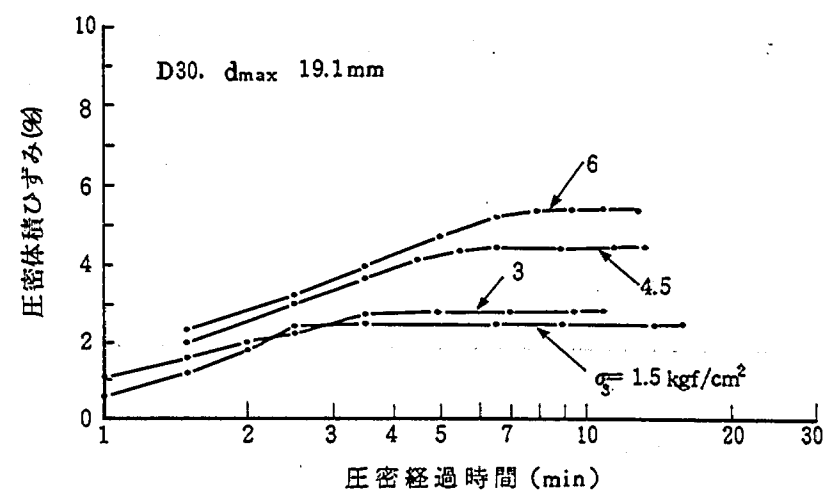
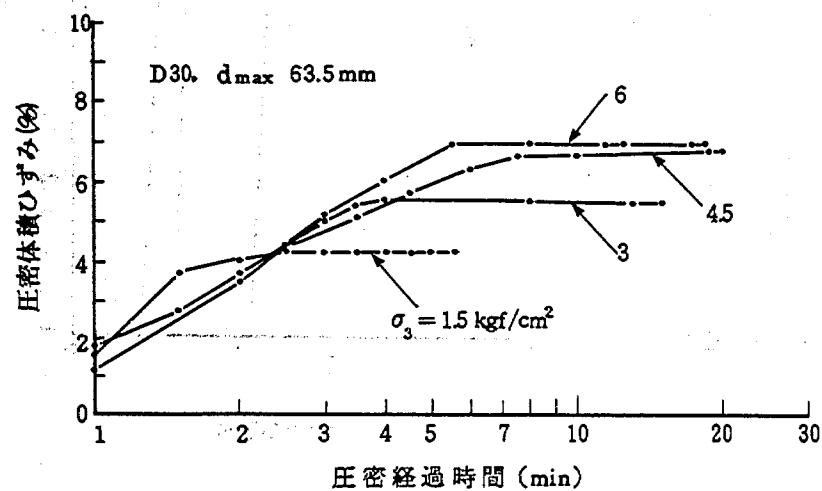
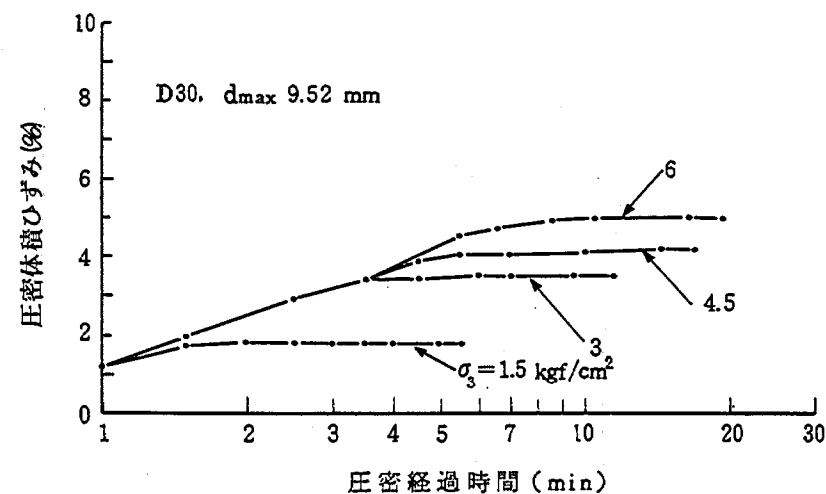
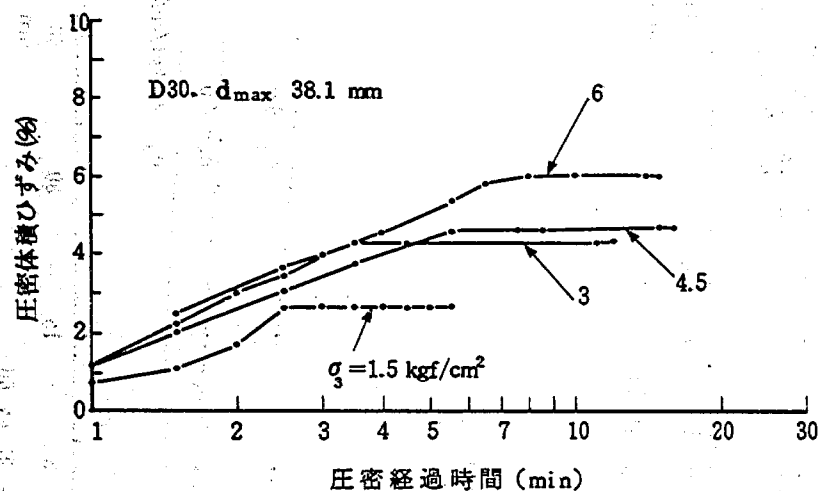


図-11 D30の圧密経過時間と圧密体積ひずみ

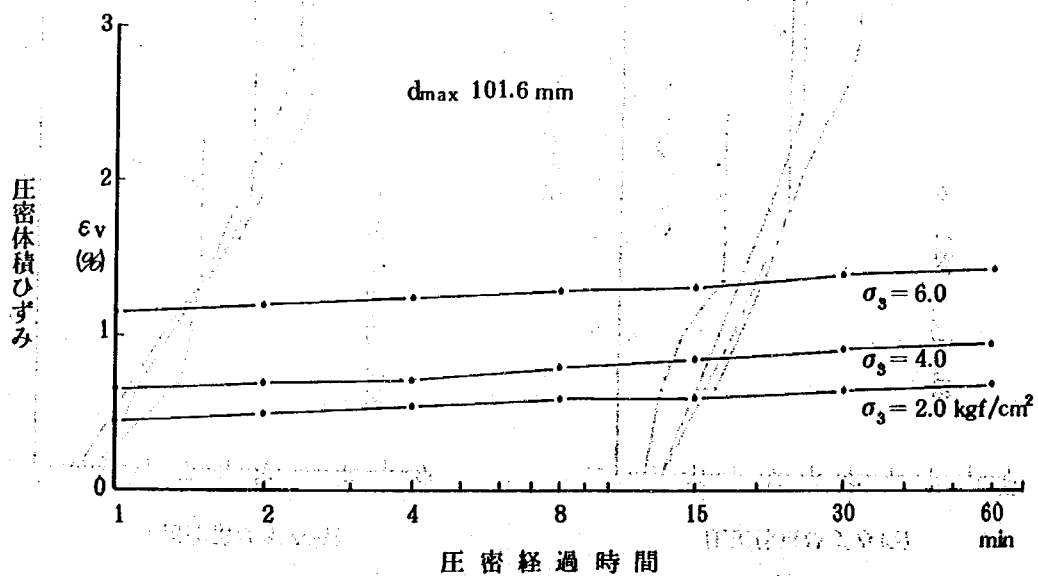
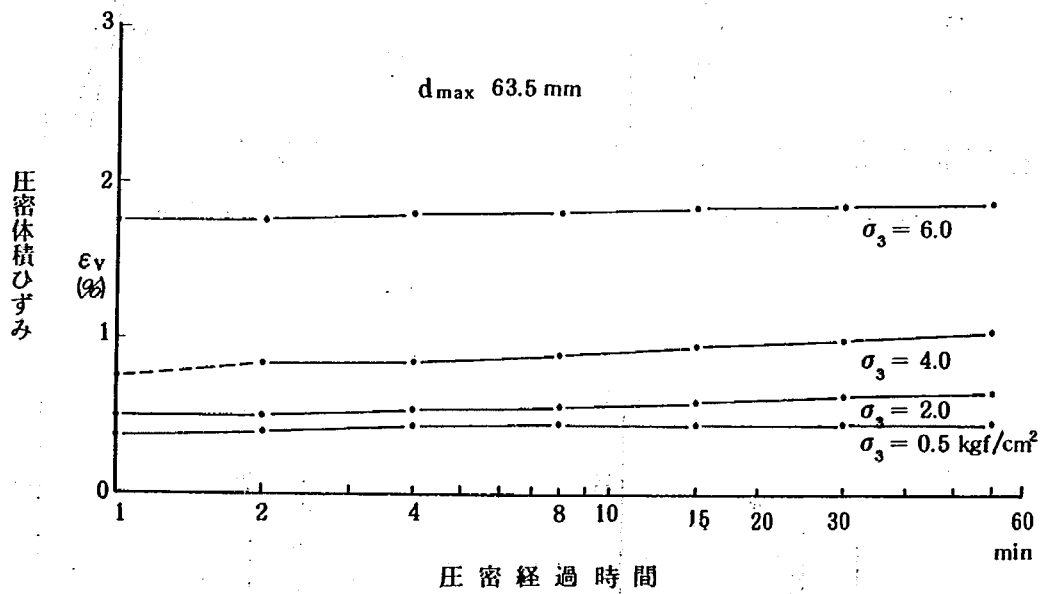
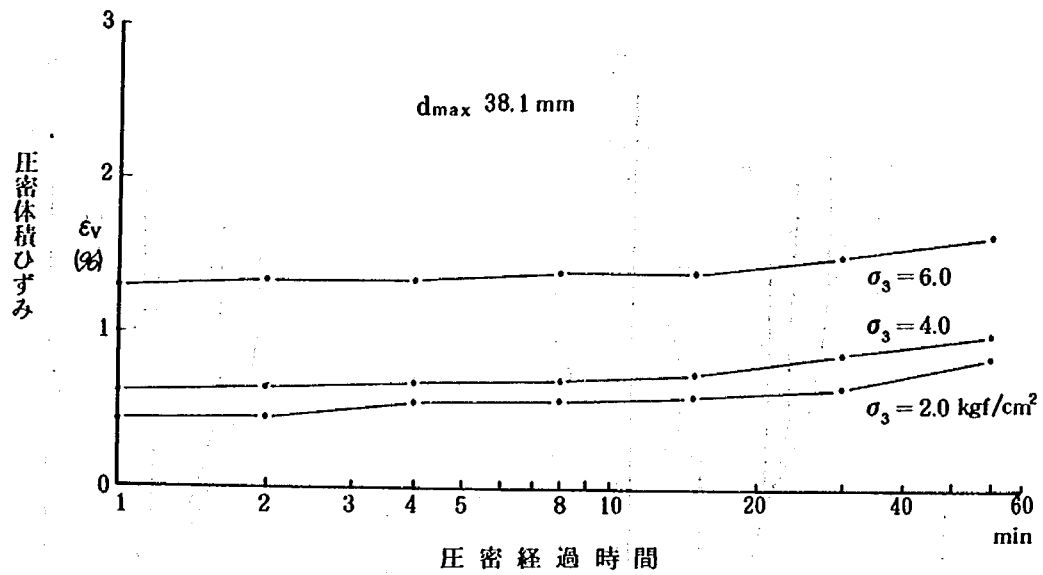


図-12 D50の圧密経過時間と圧密体積ひずみ

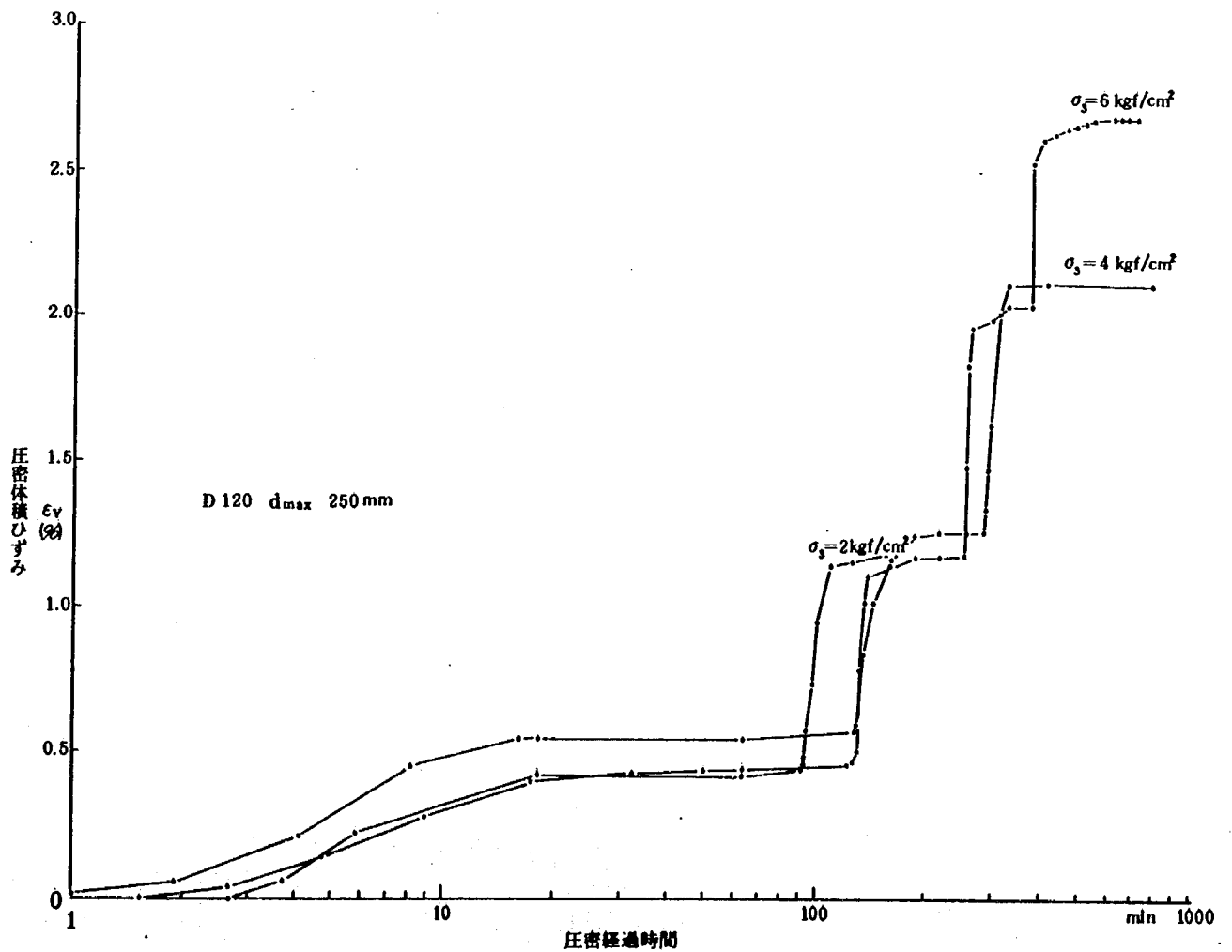
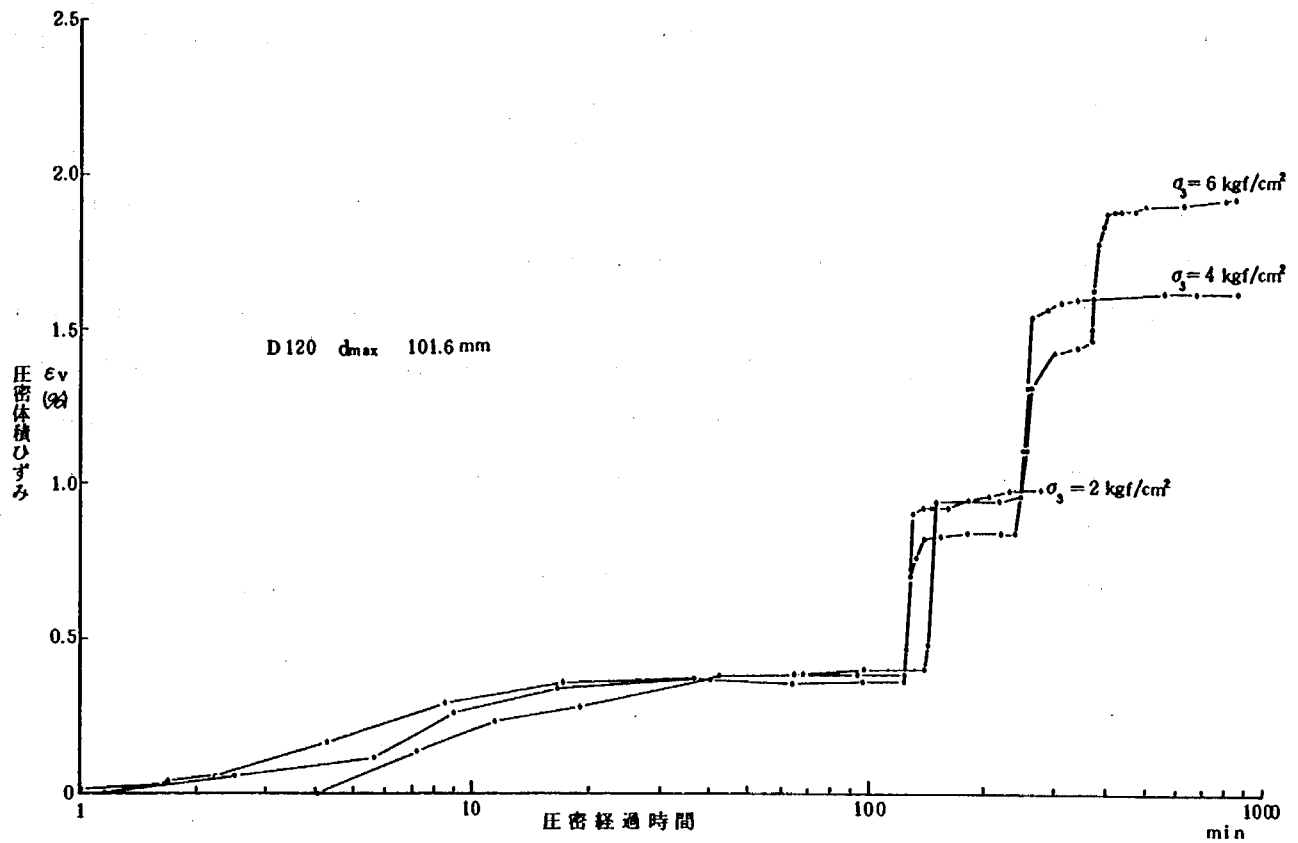
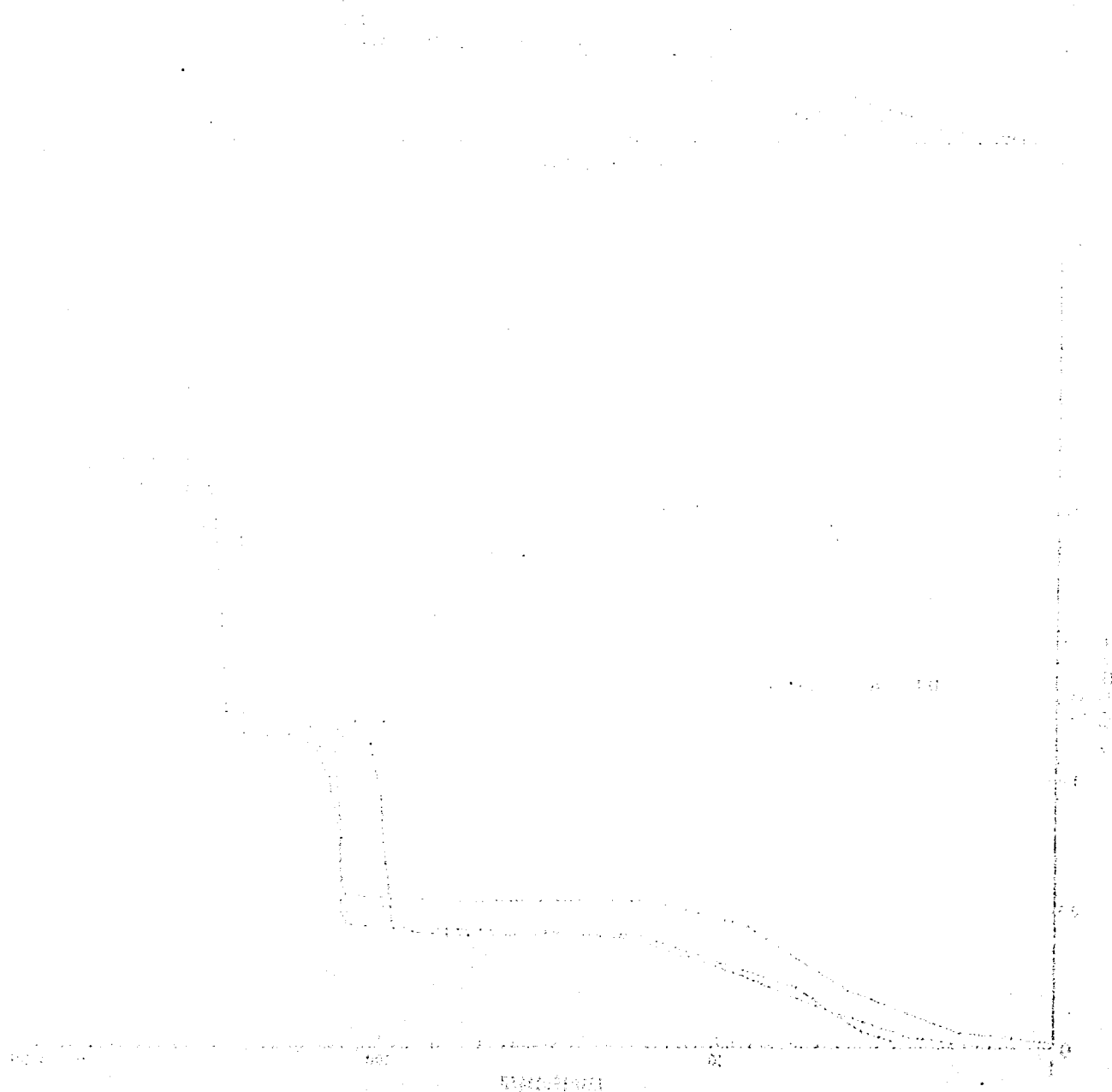


図-13 D 120 の圧密経過時間と圧密体積ひずみ

D 50, D 120 に比較して D 30 の圧密体積ひずみが大きな値を示している。この原因のひとつには、供試体の作成方法が D 30 のみ試料全体をテーブル上で加振しているため、供試体中の上部が下部に比べて小さい密度となっていることが考えられる。差を生じたもう 1 つの要因としては D 50, D 120 の場合には供試体の自立を助けるために $0.2 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の負圧を与えた状態で圧密を開始したものであるが D 30 の場合には負圧を与えていない。このために圧密開始直後にゴムスリーブが側圧の増加に伴って供試体側面の凹凸部に密着することによって生ずる見掛けの体積変化量の差が考えられる。D 30 の場合にゴムスリーブが供試体側面の凹凸部に密着するときの体積変化量は既に行った実験によれば $300 \sim 500 \text{ cm}^3$ である。 $300 \sim 500 \text{ cm}^3$ を体積ひずみに換算すると 1 % 程度である。

4.2.2 応力ひずみ曲線

D 30, D 50 および D 120 の応力ひずみ曲線を図 - 14 から図 - 22 に示す。



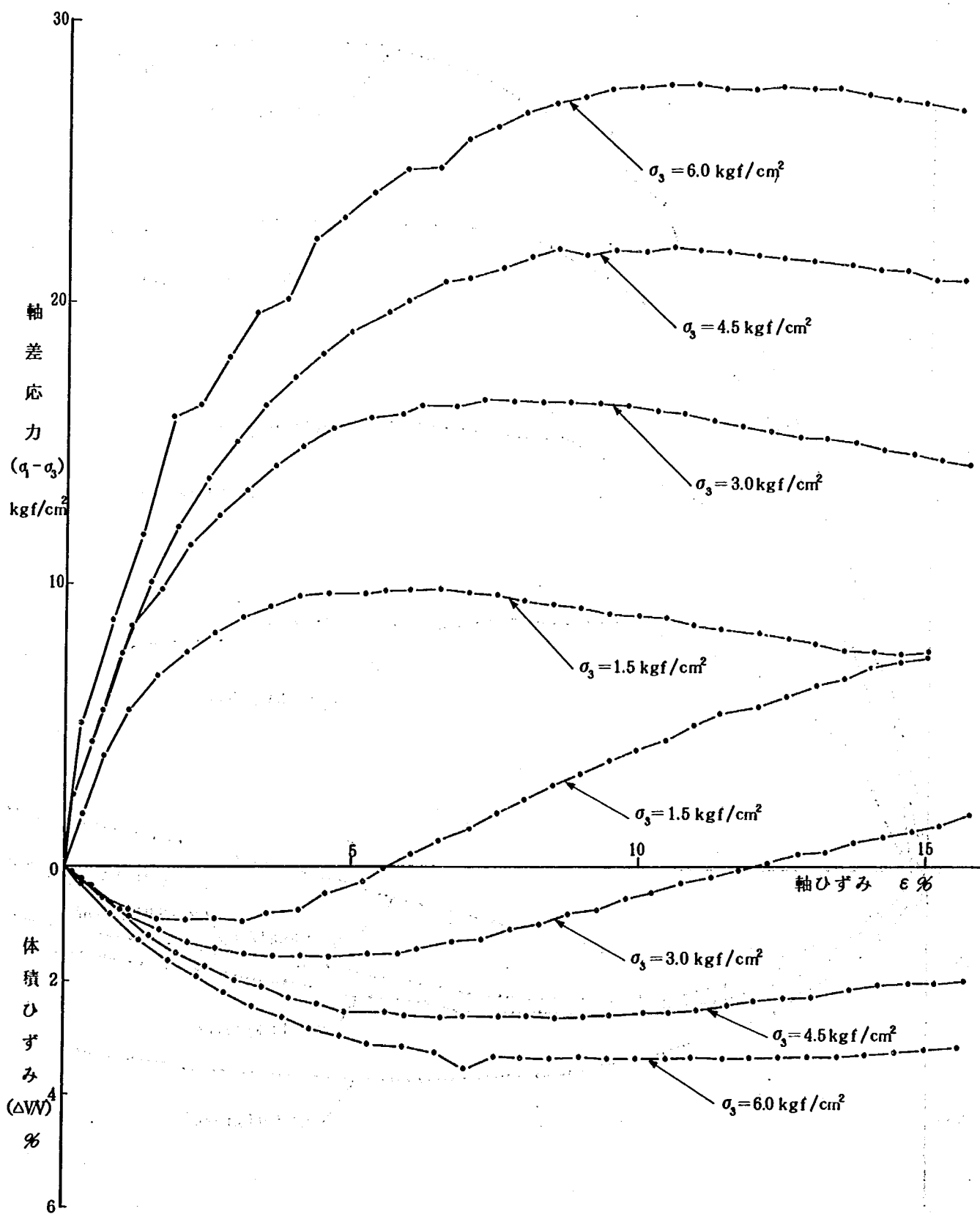


図-14 D.30, $d_{\max} 9.52 \text{ mm}$ の応力～ひずみ曲線

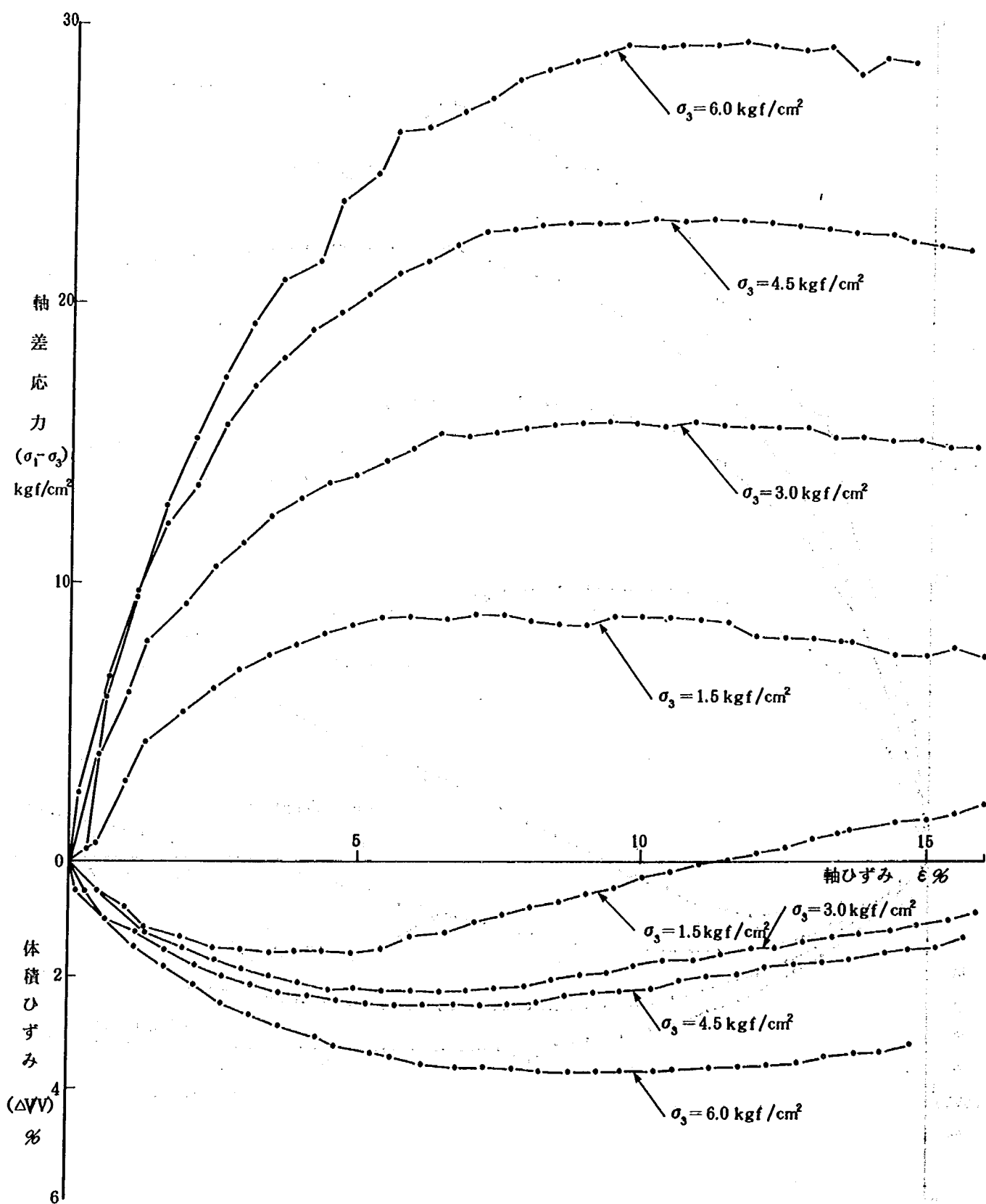


図-15 D 30, $d_{\max} 19.1 \text{ mm}$ の応力～ひずみ曲線

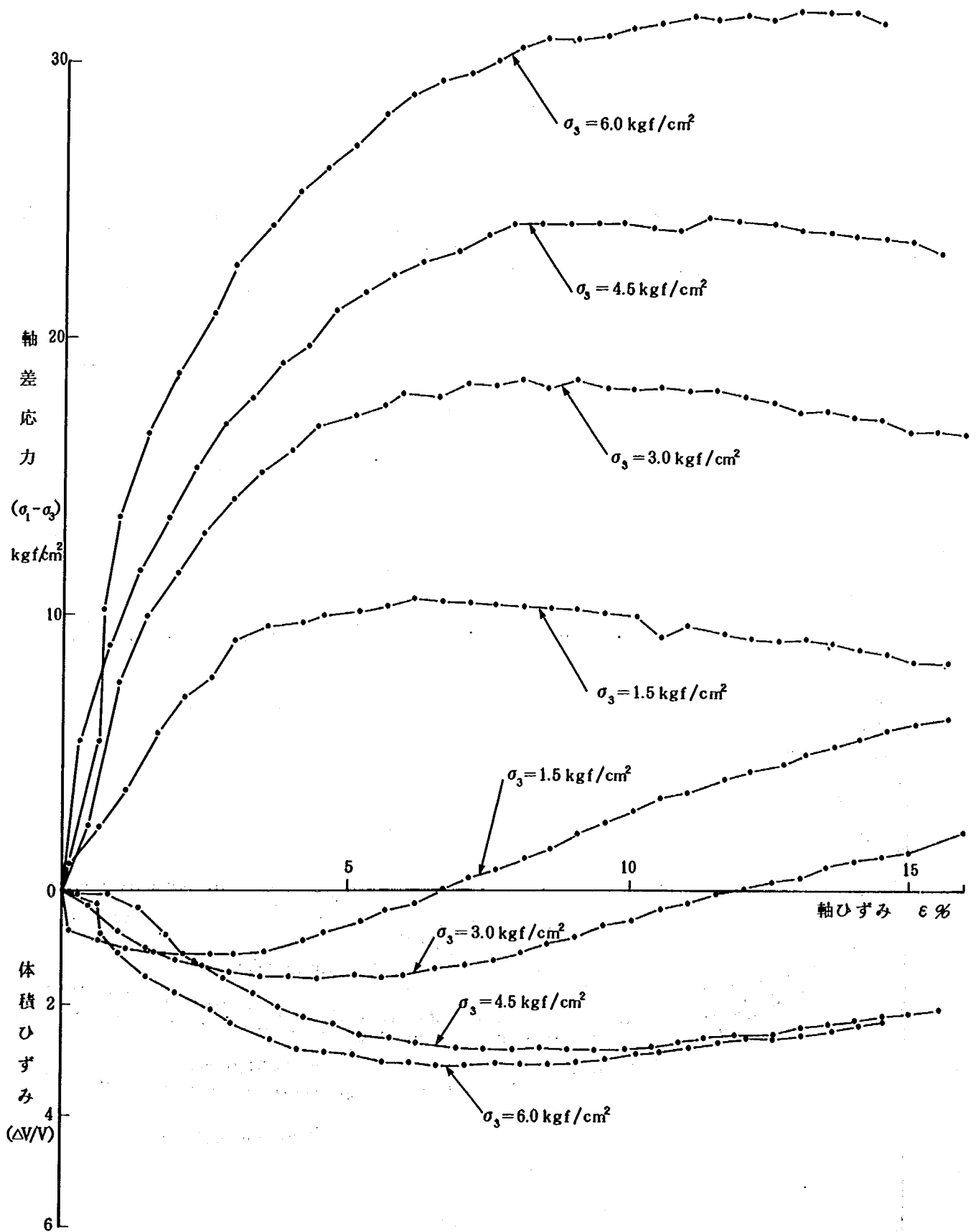


図-16 D30, $d_{\max} 38.1 \text{ mm}$ の応力～ひずみ曲線

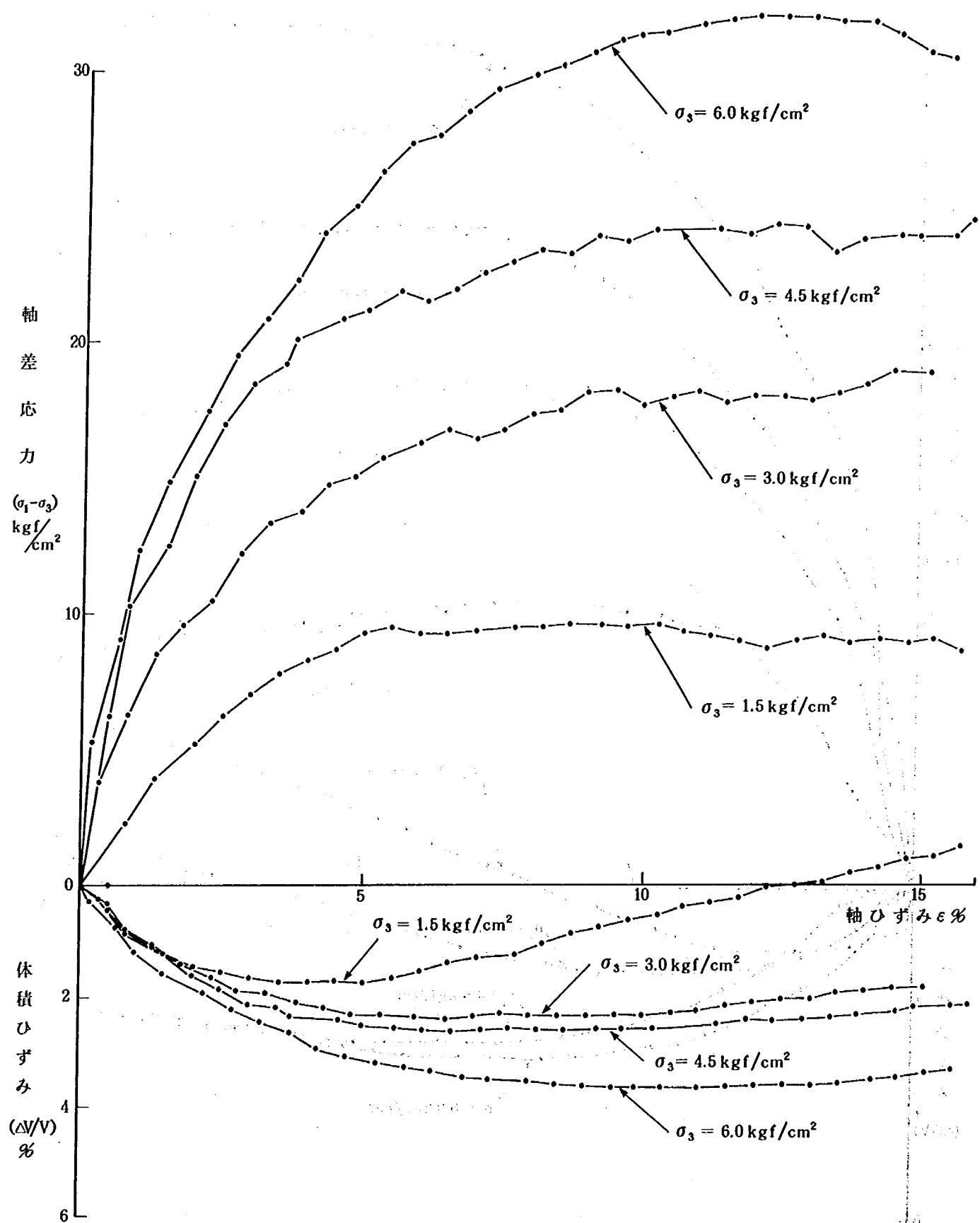


図-17 D 30, $d_{\max}$ 63.5 mm の応力~ひずみ曲線

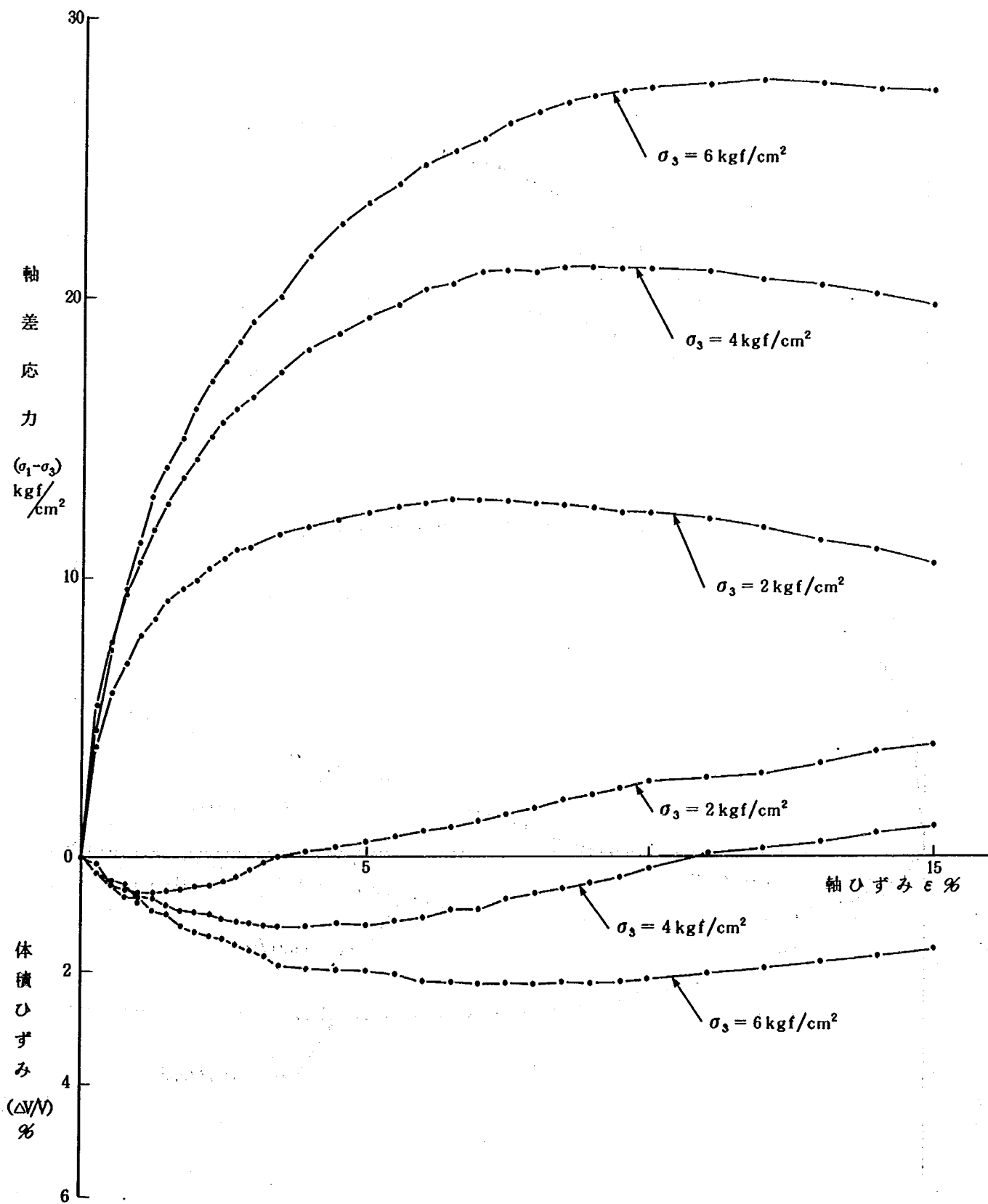


図-18 D 50, $d_{\max}$ 38.1 mm の応力-ひずみ曲線

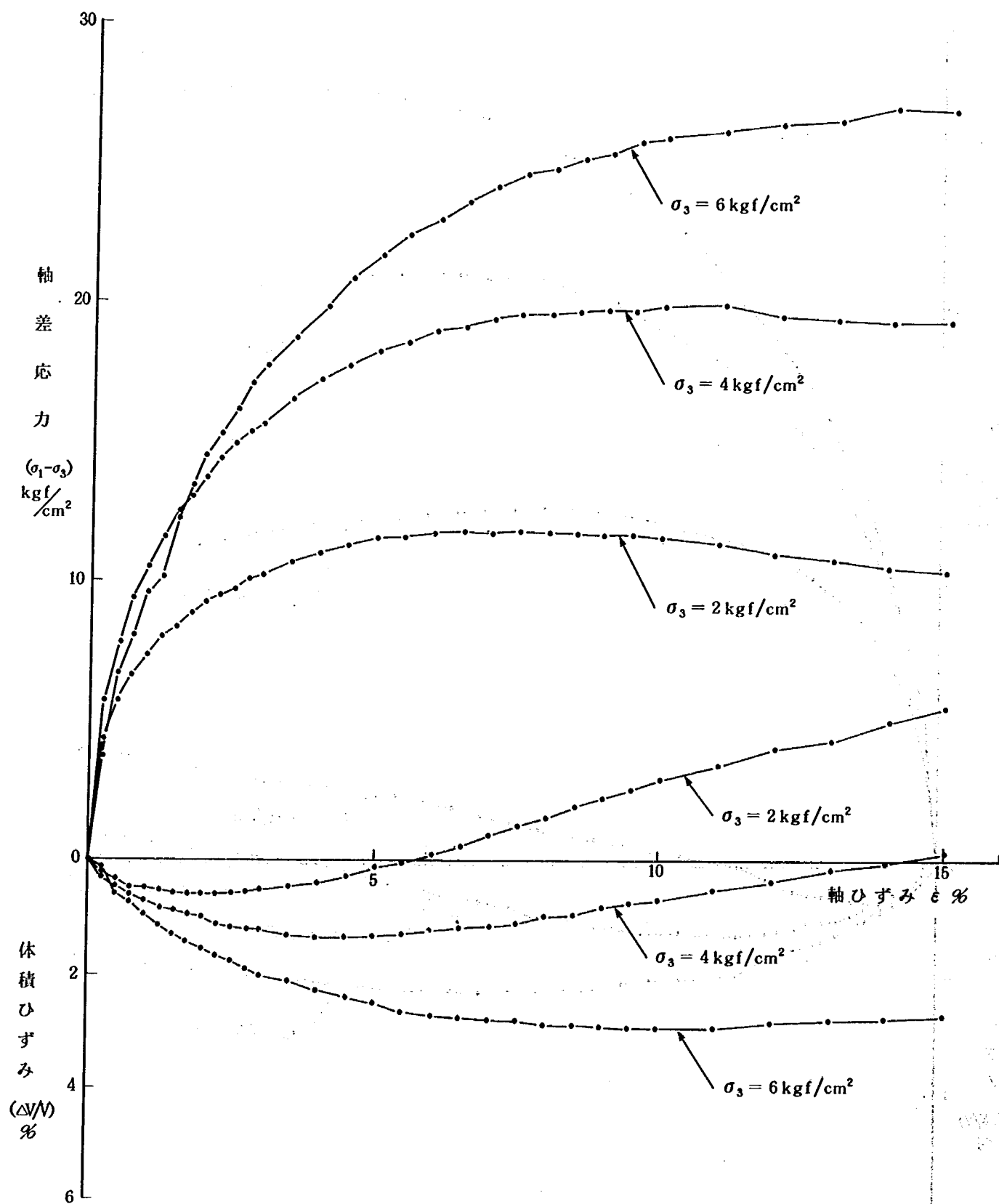


図-19 D 50, $d_{\max}$ 63.5 mmの応力～ひずみ曲線

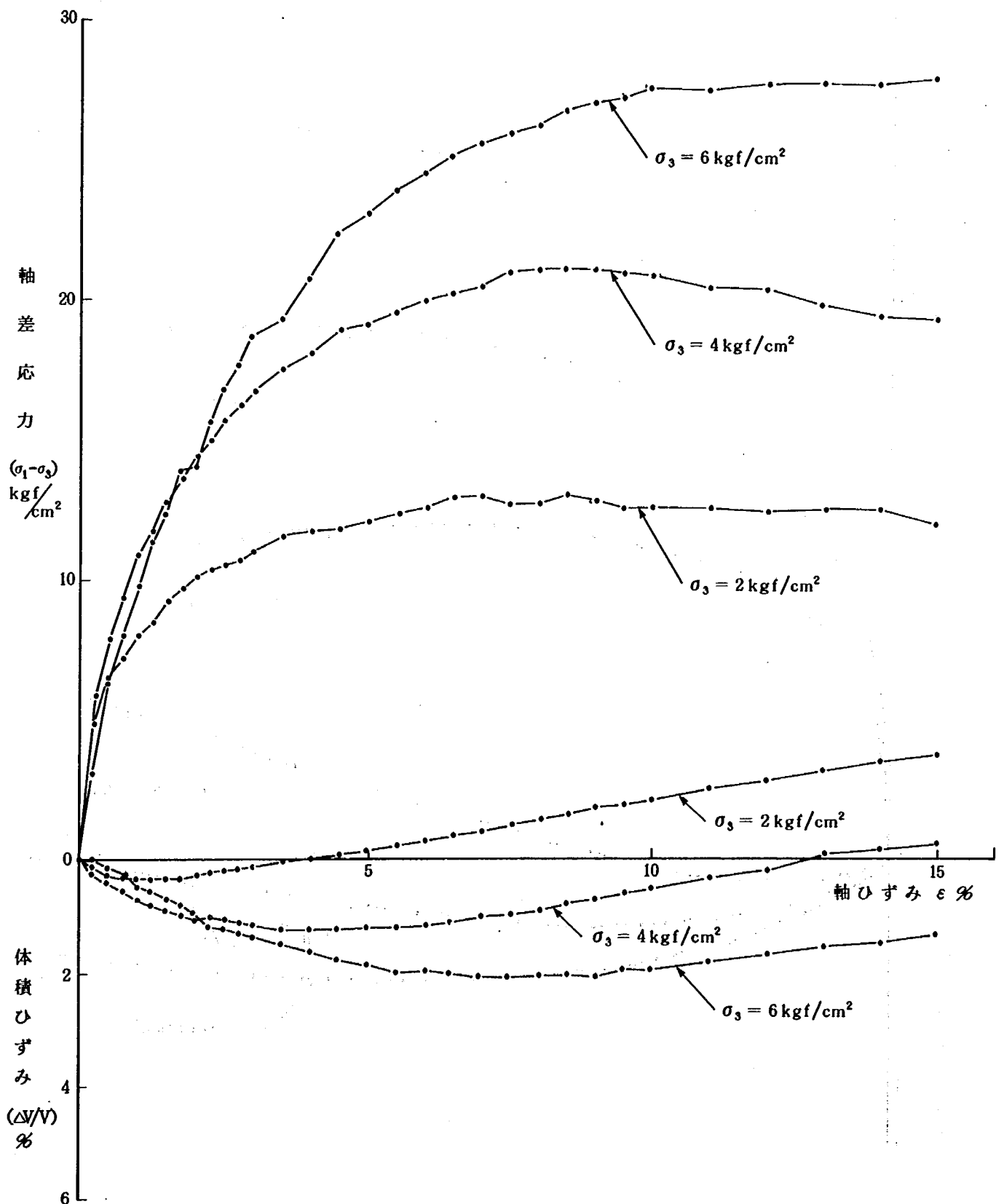


図-20 D 50, $d_{\max} 101.6 \text{ mm}$ の応力～ひずみ曲線

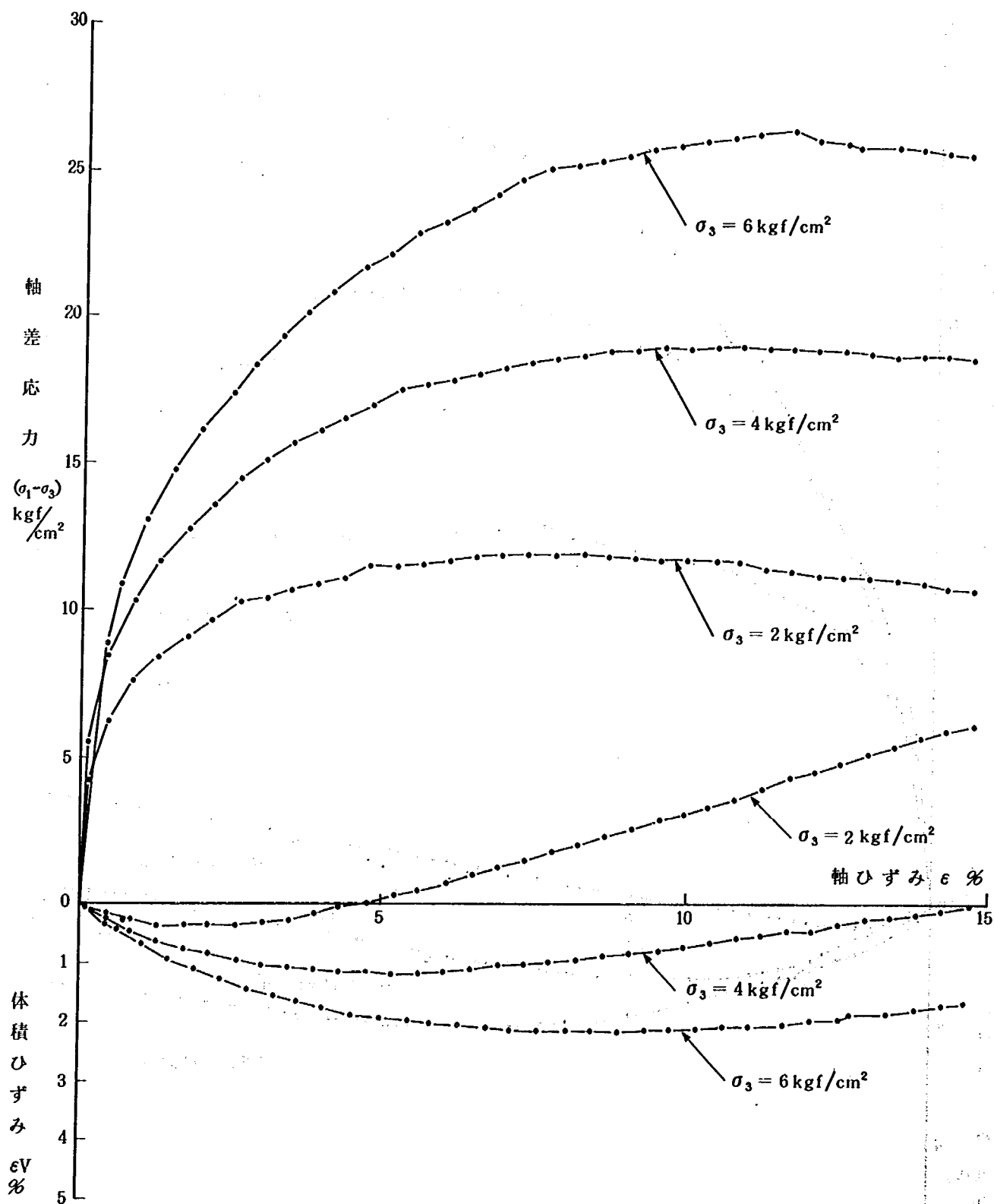


図-21 D 120, $d_{\max}$ 101.6 mm の応力～ひずみ曲線

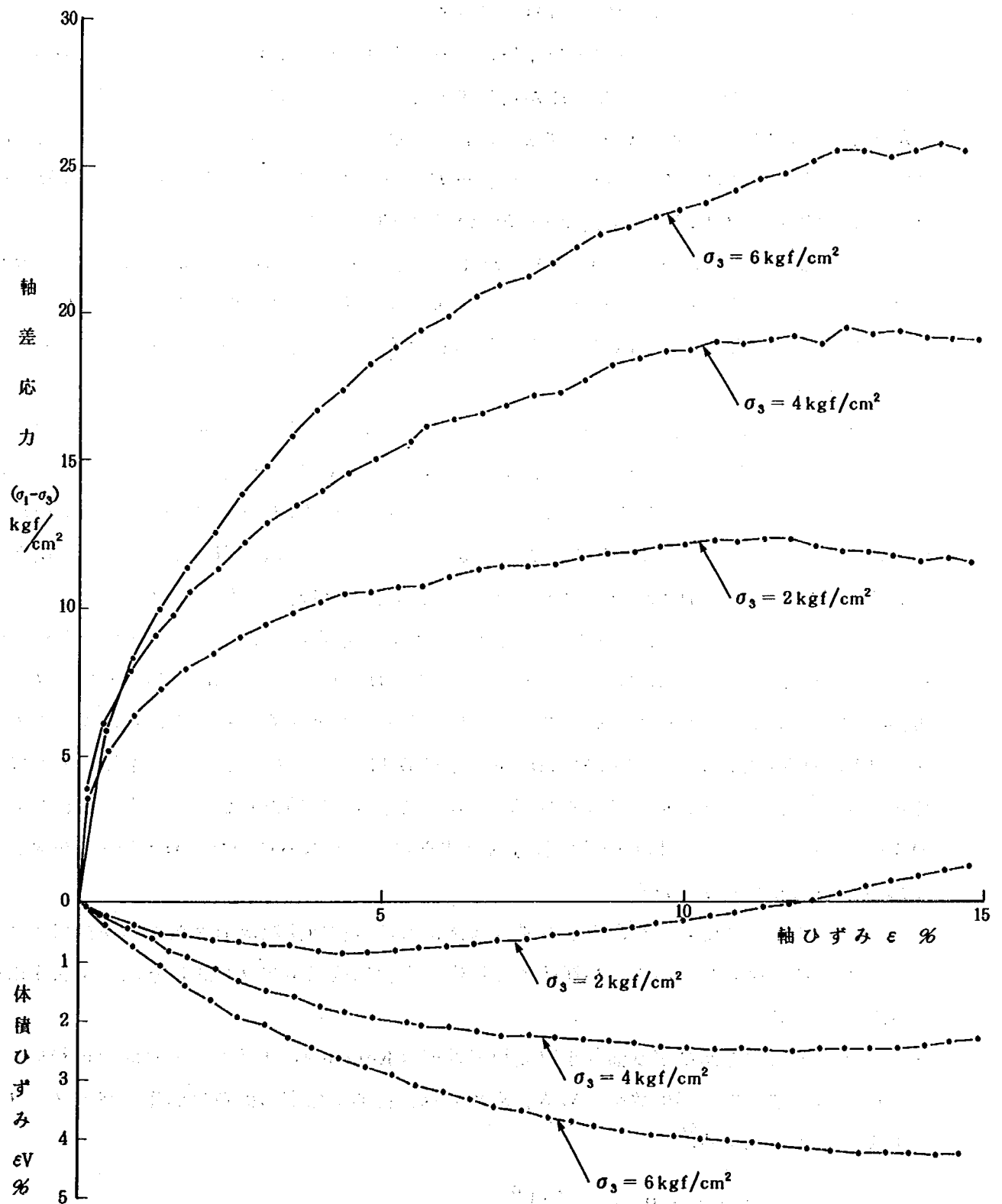


図-22 D 120, $d_{\max} 250 \text{ mm}$ の応力～ひずみ曲線

応力ひずみ曲線の変形性について考察してみる。

側圧と破壊時の軸方向ひずみおよび体積ひずみの関係を図-23に示す。D 30, D 50 および D 120 とも最大粒径によらず側圧が増加すると破壊時の軸方向ひずみおよび体積ひずみが大きくなる傾向が現われている。破壊時の軸方向ひずみの大きさは供試体および最大粒径の相違による影響は顕著に現われていない。一方、破壊時の体積ひずみ量（圧縮）は D 50, D 120 に比較して D 120 の $d_{\max} 250$ を除いて D 30 が大きい。

側圧と割線変形係数の関係を図-24, 25に示す。割線変形係数は $(\sigma_1 - \sigma_3) / \epsilon$ より求めたものである。E₅₀ の割線変形係数の値は、最大主応力差の2分の1とその値に対応した軸方向ひずみより求めた。E_f の割線変形係数は最大主応力差とその値に対応した軸方向ひずみより求めた。

図-24に示した側圧と E₅₀ の関係では、D 30 の場合には側圧の増加とともに E_f が小さくなっているが、D 50, D 120 の場合には D 30 とは逆に側圧が増加すると E_f が小さくなっている。D 50, D 120 については、軸ひずみの小さい範囲での測定値の精度が低いため誤差が大きく、このような結果になったと推定できる。図-25に示した側圧と E_f の関係では D 30, D 50 および D 120 とも側圧が大きくなると E_f が大きくなっている。

最大粒径、粒度、側圧が同じで供試体寸法のみ異なる場合の応力とひずみ曲線の形状比較を図-26から図-29に示す。図-26と図-27の D 30 と D 50 の比較では D 30 の方が軸方向ひずみの増加にともなう体積ひずみおよび主応力差が大きく現われている。図-28と図-29の D 50 と D 120 の比較では D 50 および D 120 は軸方向ひずみの増加にともなう体積ひずみの変化はほとんど同じである。一方、主応力差は軸方向ひずみが小さな範囲では D 120 の方が大きく現われているが軸方向ひずみが大きくなるにつれて D 50 の方が大きな主応力差が現われてきている。

三軸圧縮試験より得られた応力とひずみ曲線における初期接線変形係数と初期接線ポアソン比の大きさを比較してみる。初期接線変形係数と初期接線ポアソン比は下記の手法を用いて求めることにする。

- ① 主応力差と軸方向ひずみ曲線を双曲線で近似 (Kondnerの方法)³⁾して双曲線の初期接線勾配から初期接線変形係数を求める。求められた初期接線変形係数は側圧をパラメータとして次式で整理する。⁴⁾

$$E_i = k \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

E_i : 初期接線変形係数

σ_3 : 側 圧

P_a : 側圧と同じ単位で表わされた大気圧

k, n : 係 数

- ② 軸方向ひずみと半径方向ひずみ曲線を双曲線で近似 (Kulhawy, Duncan, Seed の方

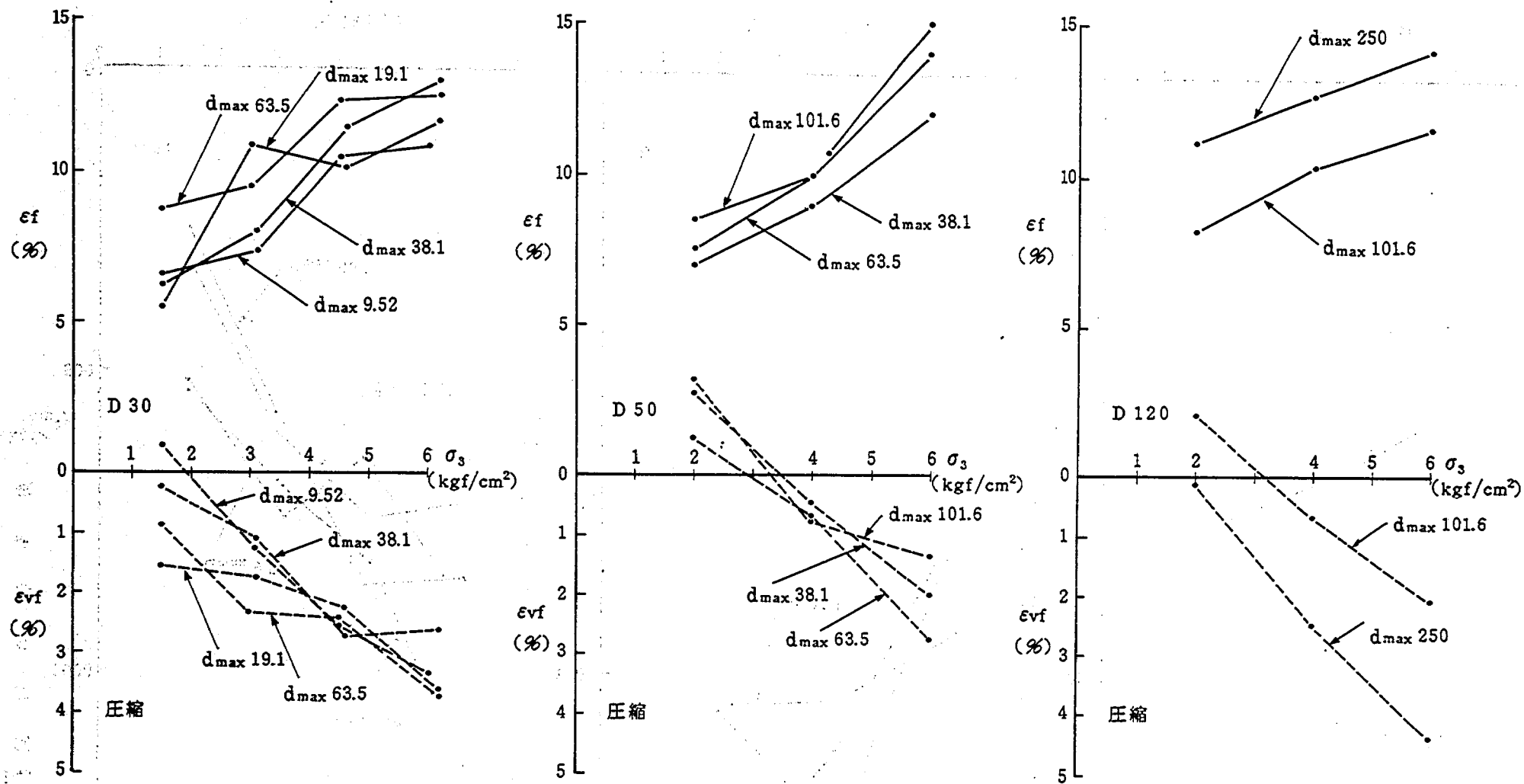


図-23 側圧と破壊時の軸ひずみおよび体積ひずみ

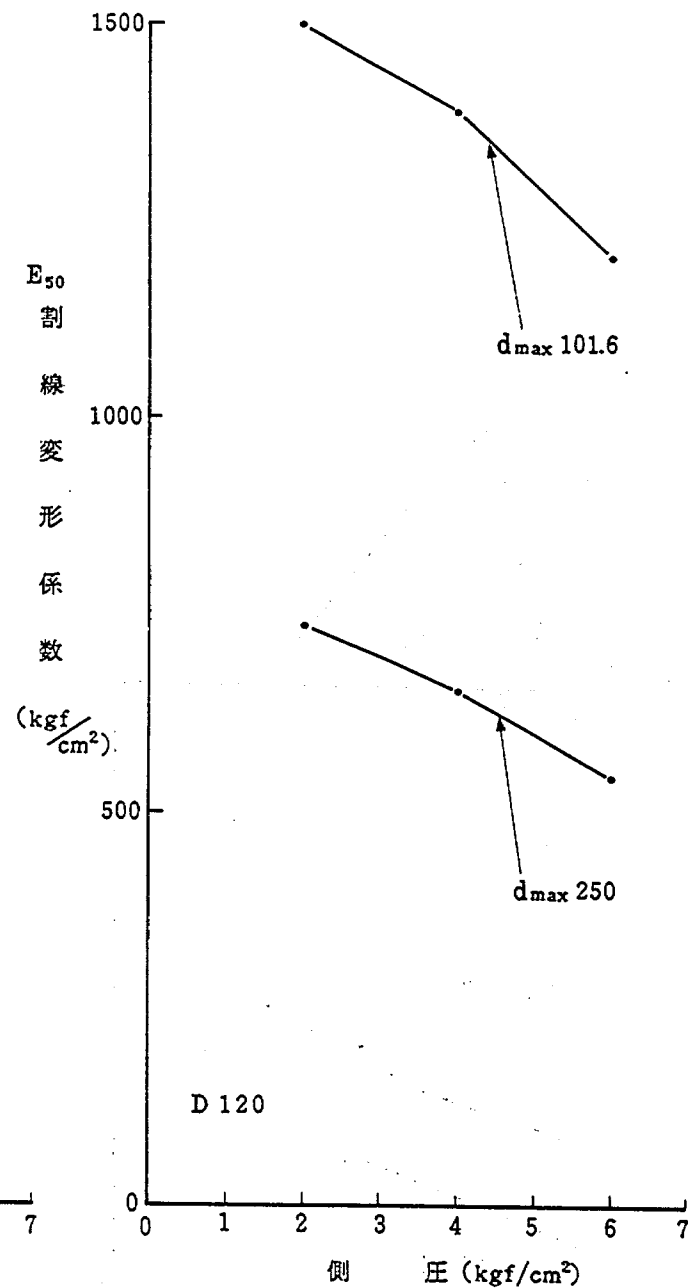
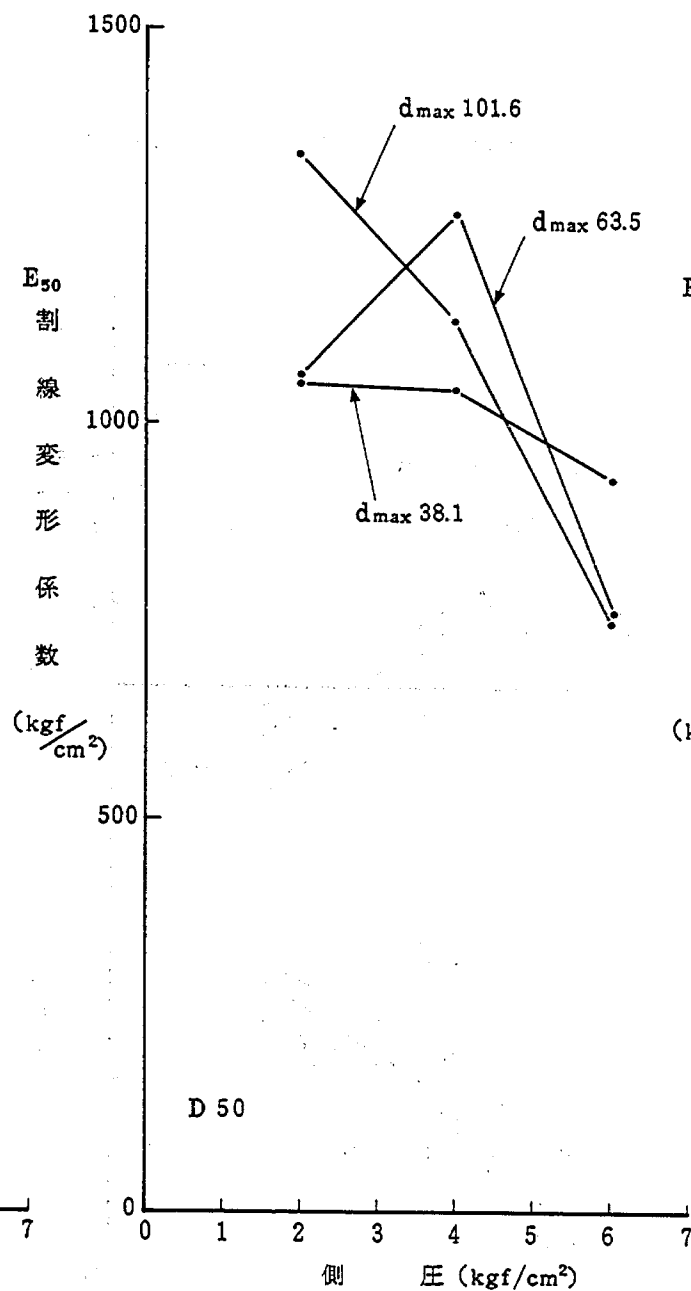
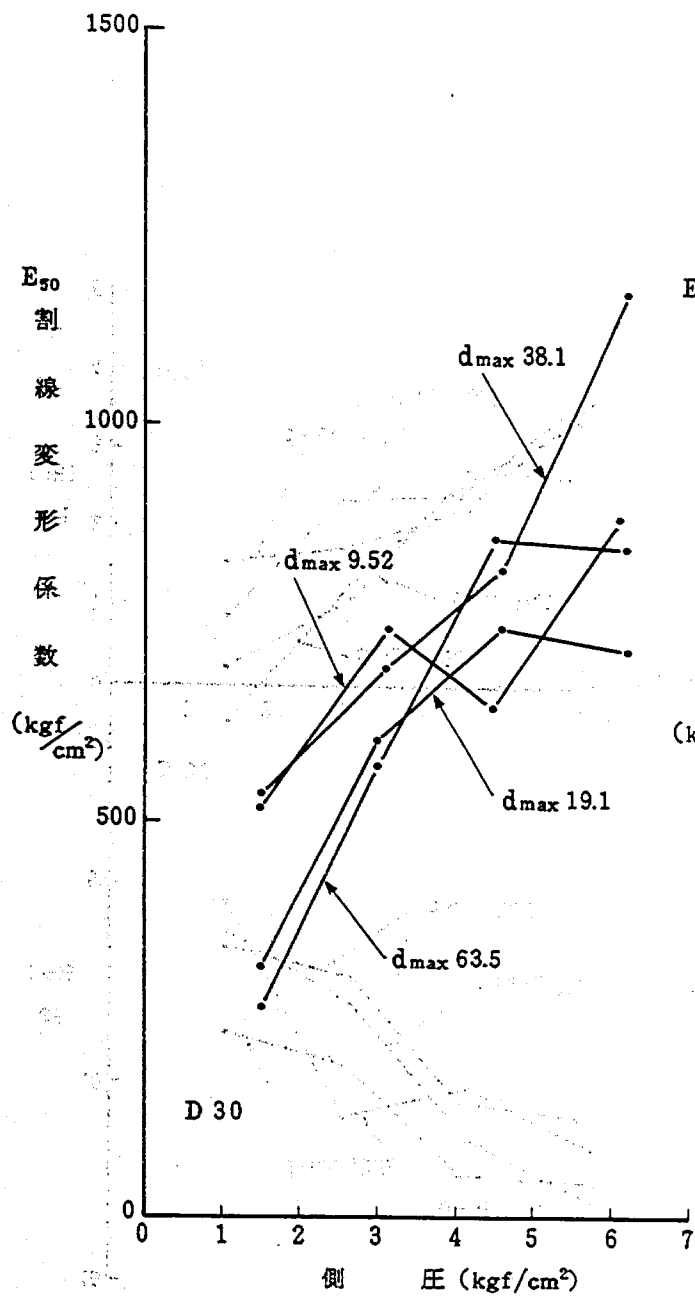


図-24 側圧と E_{50} 割線変形係数

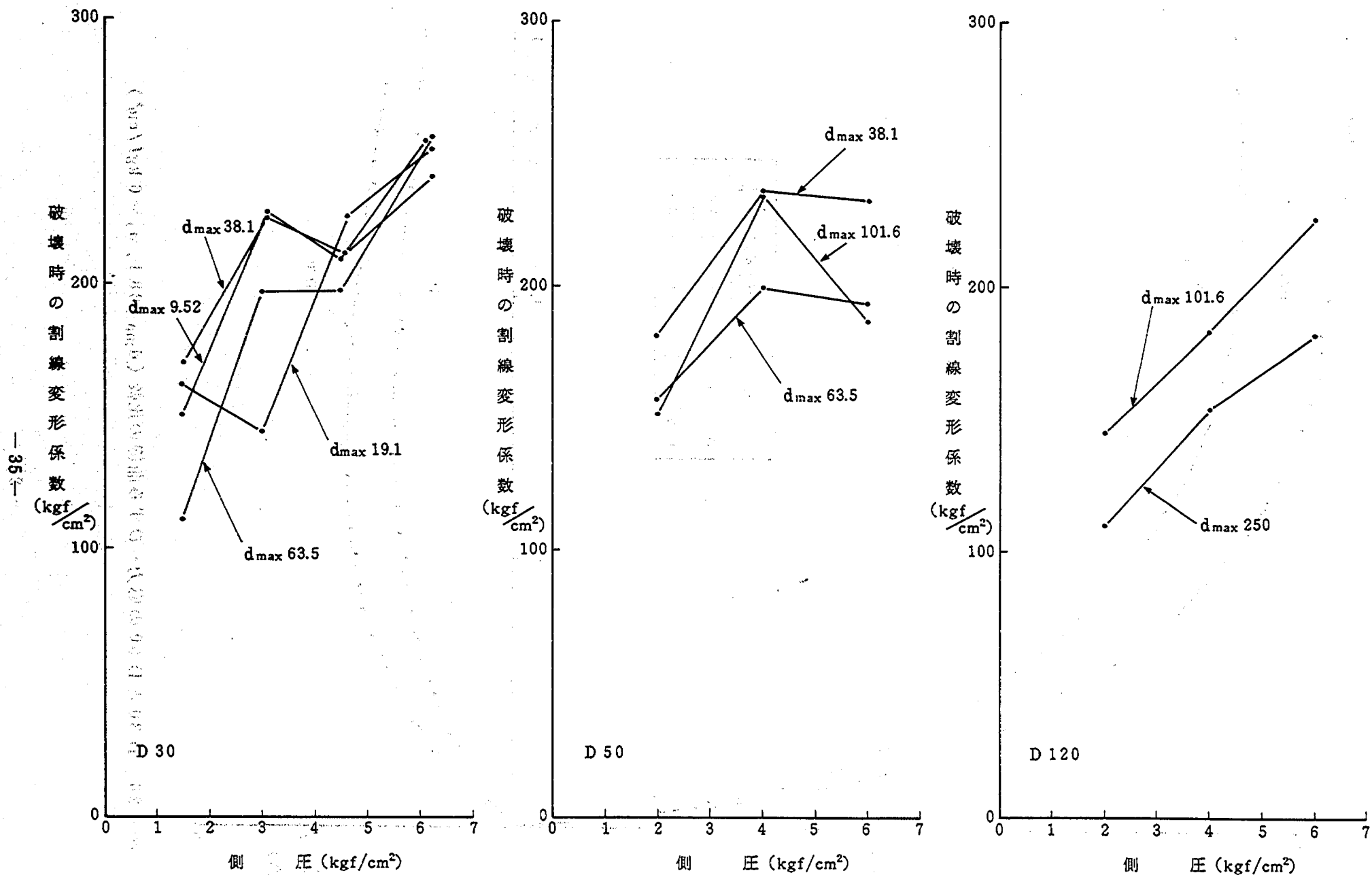


図-25 側圧と破壊時の割線変形係数

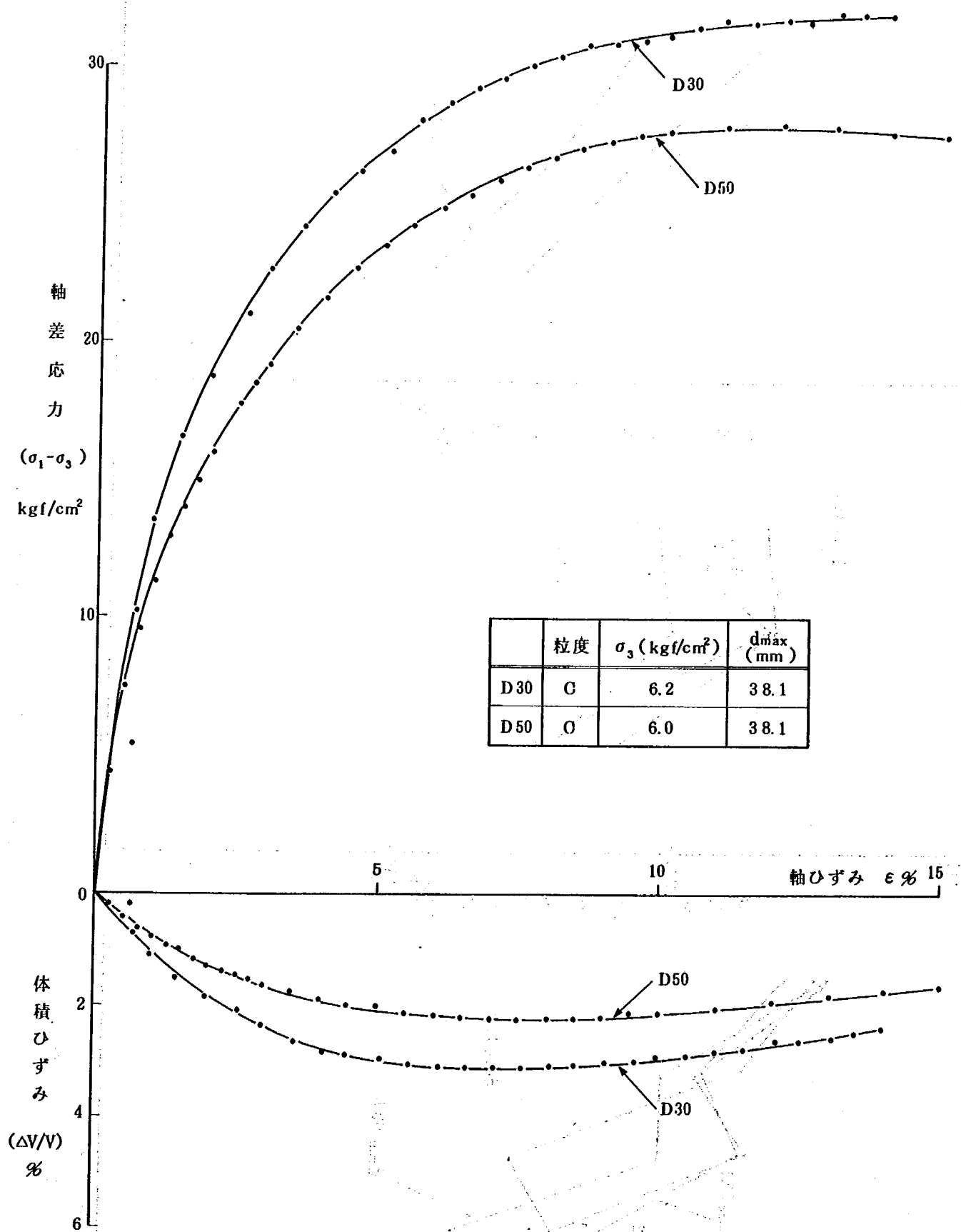


図-26 D30とD50の応力～ひずみ曲線の比較 (d_{max} 38.1, $\sigma_3 = 6$ kgf/cm²)

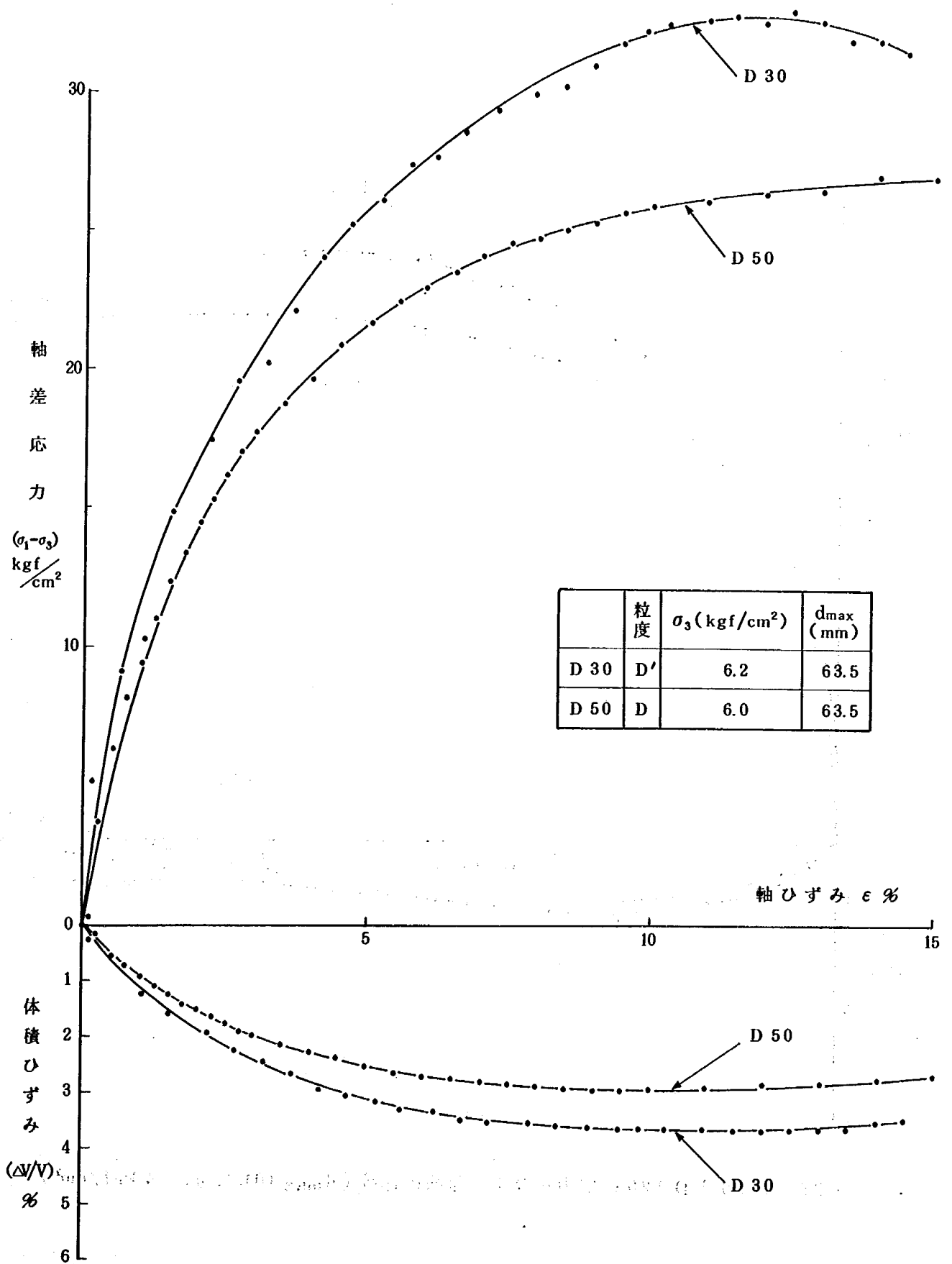


図-27 D 30 と D 50 の応力～ひずみ曲線の比較 ($d_{\max} 63.5$, $\sigma_3 = 6 \text{ kgf/cm}^2$)

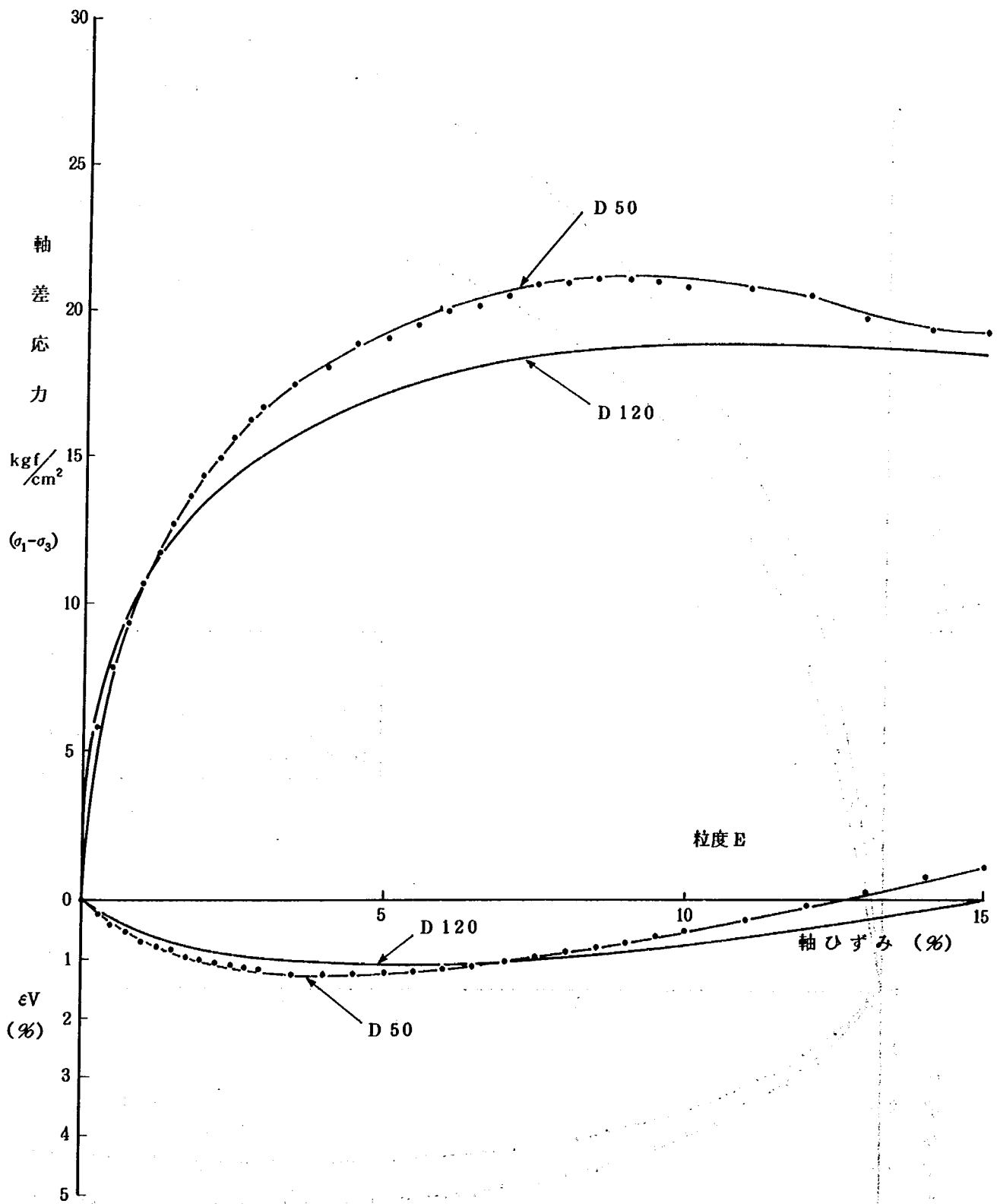


図-28 D 50 と D 120 の応力～ひずみ曲線の比較 ($d_{\max} 101.6$, $\sigma_3 = 4 \text{ kgf/cm}^2$)

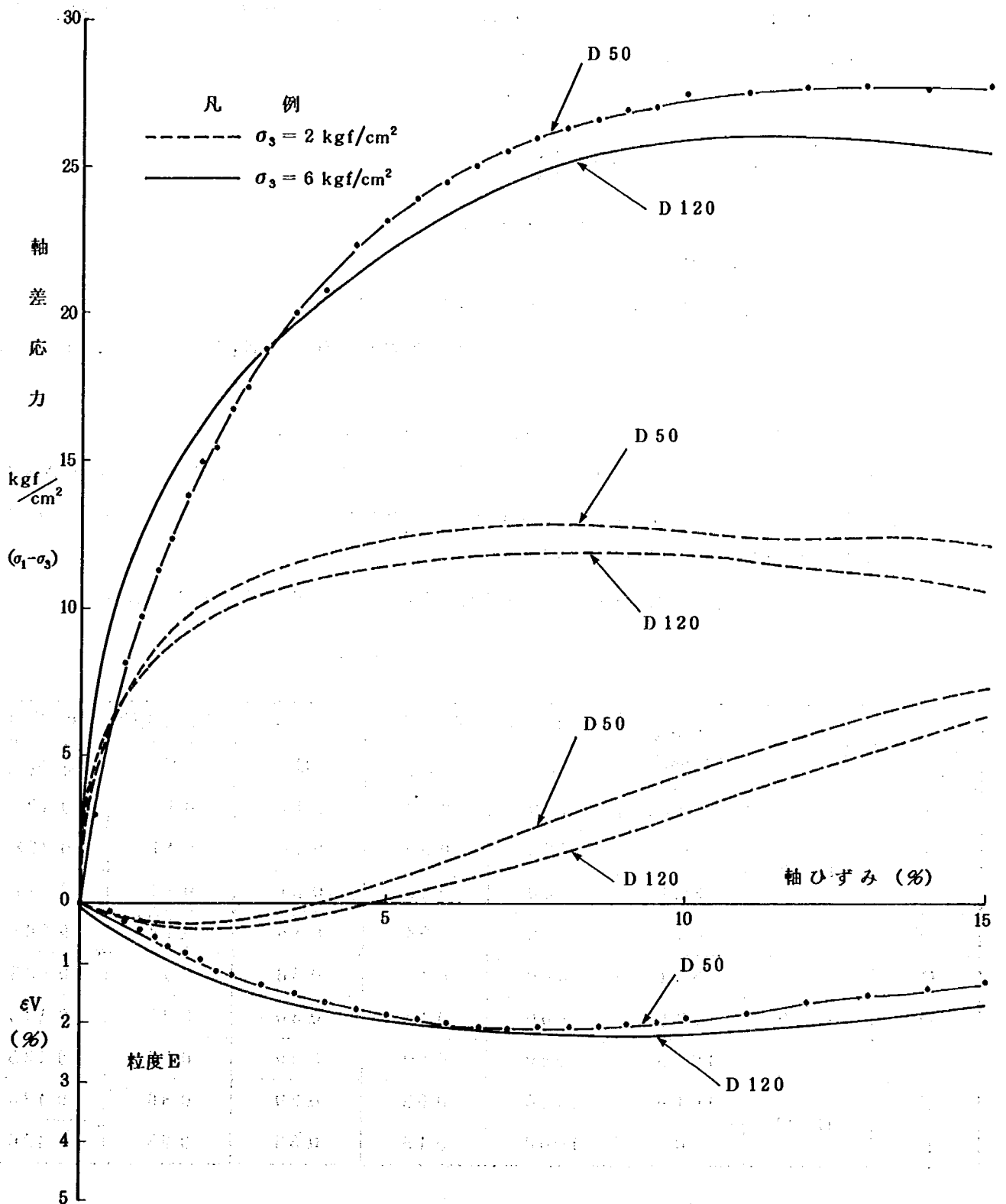


図-29. D 50 と D 120 の応力～ひずみ曲線の比較 ($d_{\max} 101.6$, $\sigma_3 = 2, 6 \text{ kgf/cm}^2$)

法)⁵⁾して双曲線の初期接線勾配から初期接線ポアソン比を求める。求められた初期接線ポアソン比は側圧をパラメータとして次式で整理する。なお、半径方向ひずみは $(\epsilon_r - \epsilon) / 2$ で計算する。

$$\nu_i = G - F \log \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)$$

ν_i : 初期接線ポアソン比

G, F : 係 数

側圧と初期接線変形係数 (E_i) の関係を図-30 に示す。

D 30 は D 50 および D 120 に比較して側圧が大きくなると E_i も大きくなる傾向が顕著に現われている。

側圧と初期接線ポアソン比 (ν_i) の関係を図-31 に示す。

D 30, D 50 および D 120 とともに最大粒径によらず側圧が大きくなると ν_i が小さくなる傾向が現われている。D 50 および D 120 は D 30 に比較して側圧が大きくなると ν_i が小さくなる割合が大きく現われている。

表-13 に初期接線変形係数および初期接線ポアソン比を表わす係数を示す。

表-13 変形性を表わす係数

粒 度	供 試 体	d _{max} (mm)	変形係数に関する係数		ポアソン比に関する係数		圧 密 後 平 均 間 隙 比
			k	n	G	F	
A	D 30	9.52	700	0.38	0.17	0.15	0.407
B		19.1	330	0.90	0.14	0.11	0.388
C		38.1	580	0.68	0.21	0.14	0.372
D'		63.5	380	0.94	0.15	0.13	0.386
C	D 50	38.1	1480	0.17	0.38	0.37	0.433
D		63.5	960	0.14	0.30	0.28	0.435
E		101.6	1650	0.60	0.39	0.36	0.435
E	D 120	101.6	1700	0.08	0.39	0.30	0.430
F		250	1000	0.15	0.35	0.33	0.420

圧密後の供試体平均間隙比と変形性を表わす係数の関係を図-32 に示す。変形係数に関する k は間隙比の小さなものより大きな方が大きい。一方、n は間隙比の小さなものより大きな方が小さい。ポアソン比に関する G および F は間隙比の小さなものより大きな方が大きい値を示している。変形性を表わす係数 k, n, G, F は供試体の密度に影響されているが同程度の密度では供試体寸法および最大粒径の相違によらずほぼ一定した値を示している。

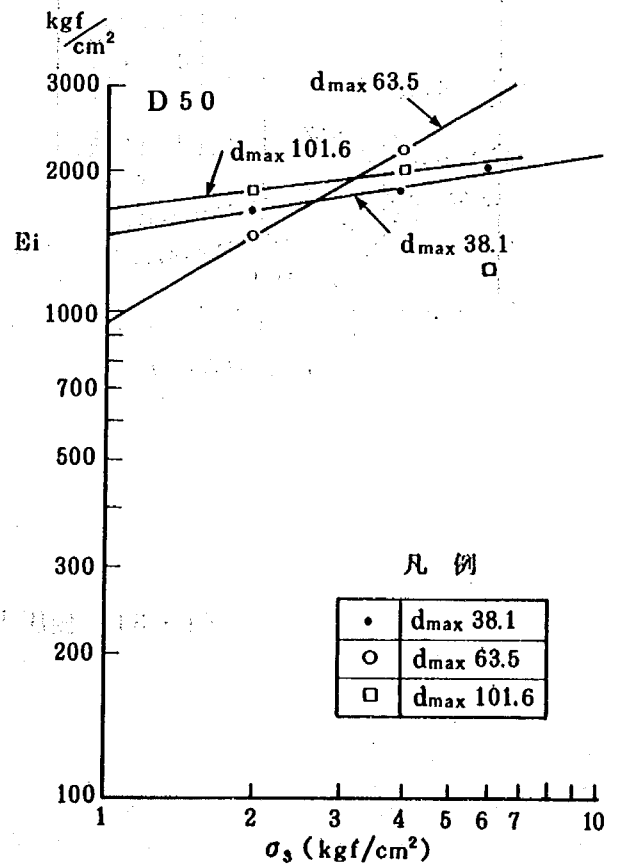
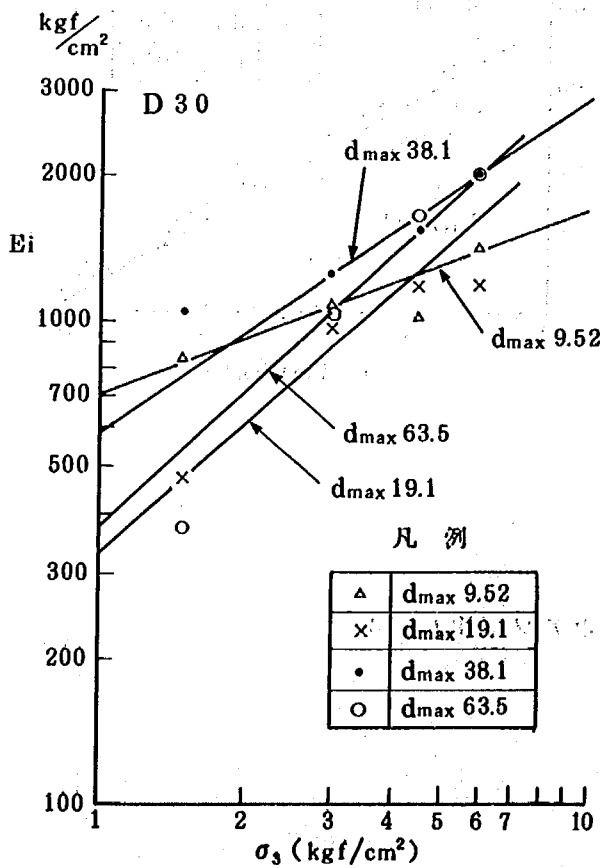
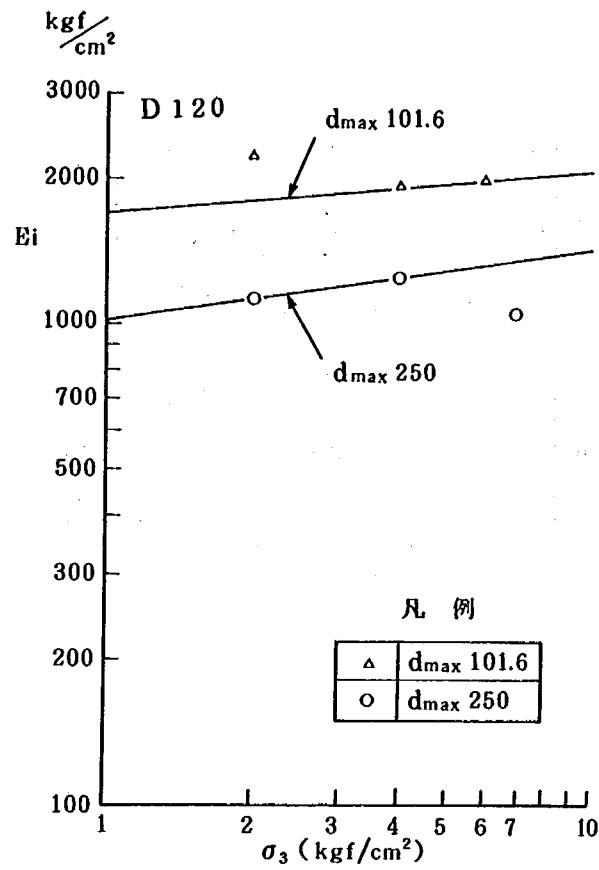


図-30 側圧と初期接線変形係数 (E_i)

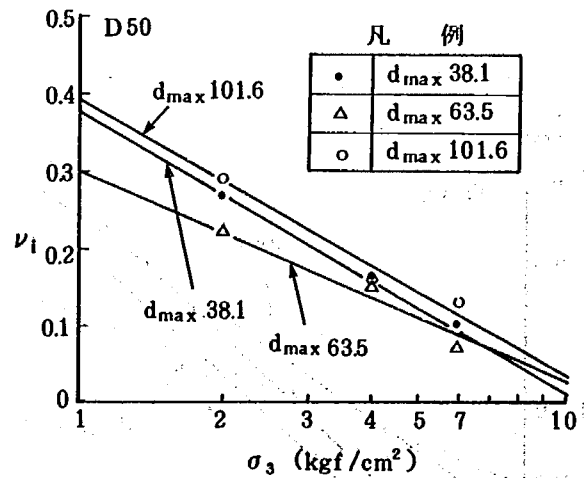
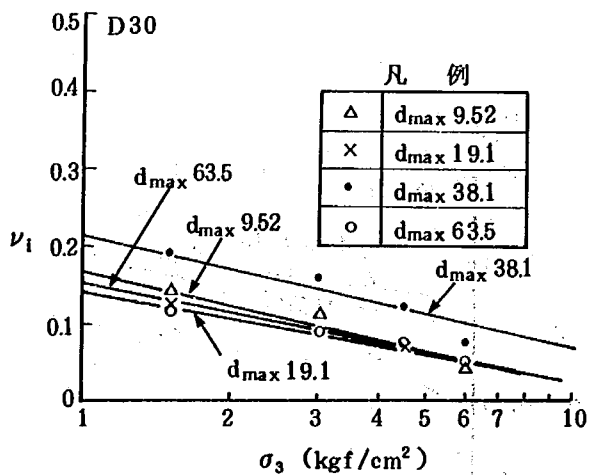
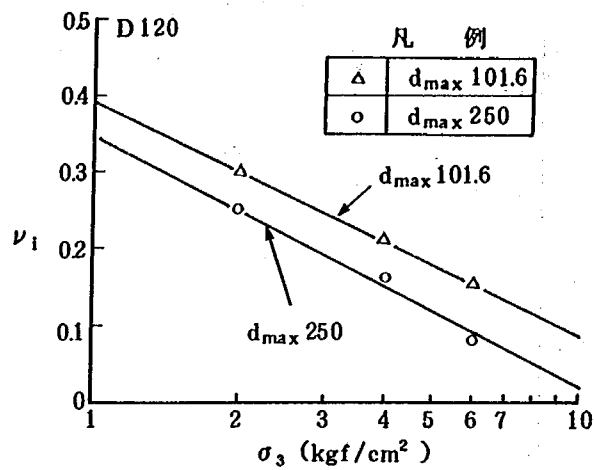


図-31 側圧と初期接線ポアソン比(ν_1)

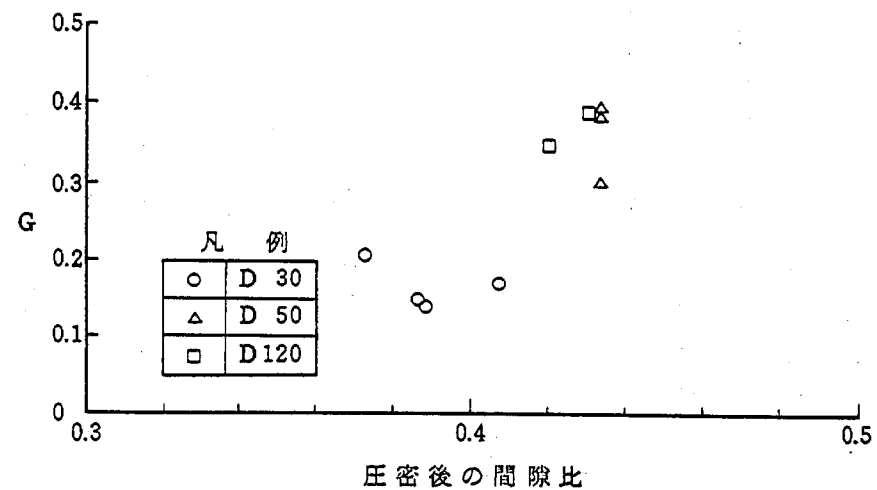
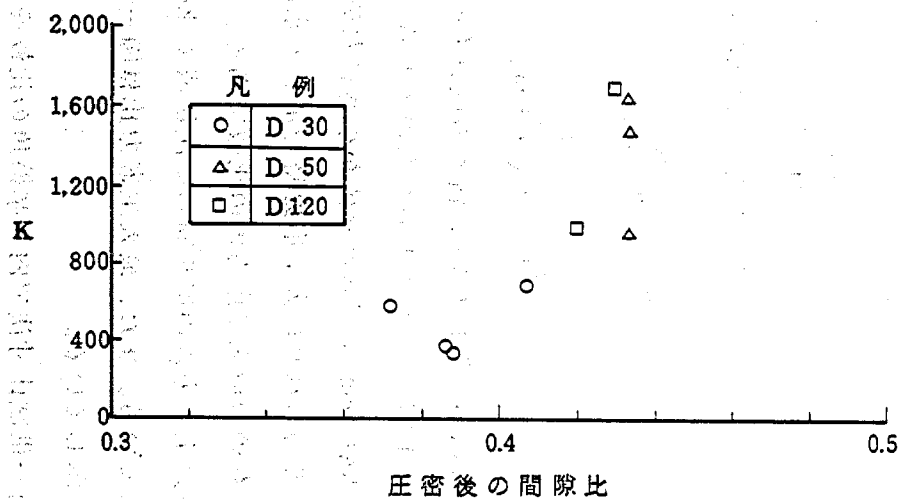
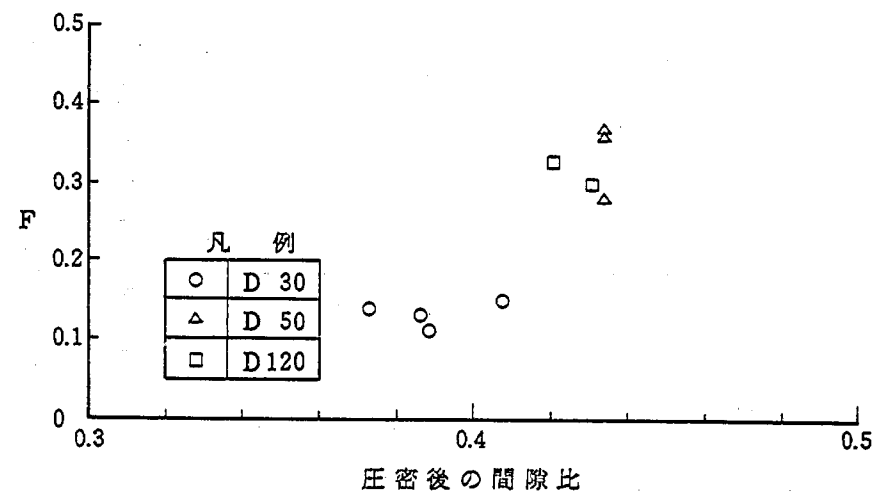
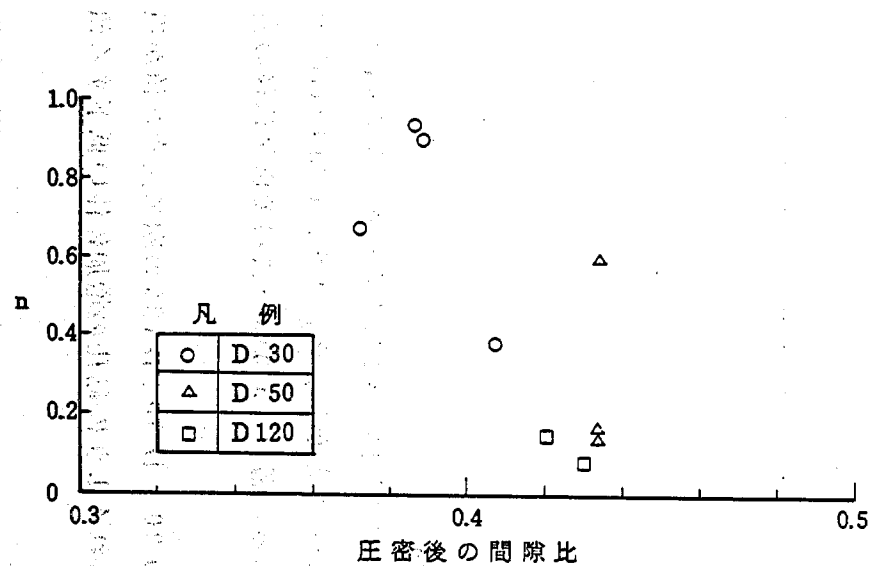


図 - 32 圧密後の間隙比と変形性を表わす係数

4.2.3 せん断強さ

モールの応力円と破壊包絡線を図-33～41に示す。

強度定数は側圧と最大主応力差の関係より求めた値である。

以下に求め方を示す。⁶⁾

図-42のモールの応力円と、応力円に接する包絡線
の関係から

$$\begin{aligned}\sin \phi &= \frac{R}{X} \\ &= \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{c \cdot \cot \phi + \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} \dots\dots\dots(1)\end{aligned}$$

$$\therefore (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \sigma_3 \dots\dots(2)$$

となる。そこで、図-43のように試験側圧を横軸に最大主応力差を縦軸にとり試験値をプロットする。次にプロットした点を通る直線の勾配 m_0 と縦軸の切片 f_0 を最小自乗法によって求める。求めた m_0 と f_0 は(2)式より

$$f_0 = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \dots\dots\dots(3)$$

$$m_0 = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \dots\dots\dots(4)$$

と表わすことができる。したがって(3)および(4)式より

$$\sin \phi = \frac{m_0}{2 + m_0}$$

$$c = \frac{f_0}{2 \sqrt{1 + m_0}}$$

となり内部摩擦角 (ϕ)、粘着力成分 (c) が求まる。

表-14は結果をまとめたものである。D 30については図-44にみられるように $\sigma_3 = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ で得られた値が小さ目な値を示していることから、3, 4.5, 6 kgf/cm^2 の側圧で得られた最大主応力差を用いて求めた値である。図-45は同一試料で供試体径の異なるものの最大主応力差の比較である。

最大主応力差の値を同じ側圧状態で比較するとD 30, D 50, D 120の順に大きな値が現われている。また、最大主応力比は図-46にみられるように側圧の増加に伴い低下する傾向を示している。

同一供試体寸法で内部摩擦角の比較を行うと、D 30で得られた値は476 mm以下の粒径

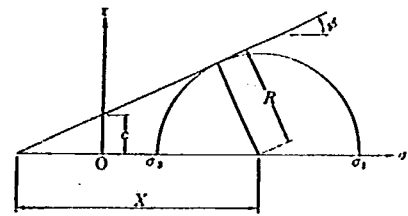


図-42 モールの応力円

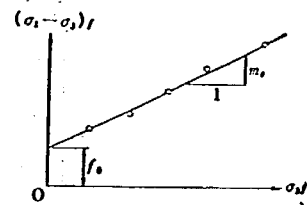


図-43 $\sigma_3 f$ と $(\sigma_1 - \sigma_3) f$ のプロット

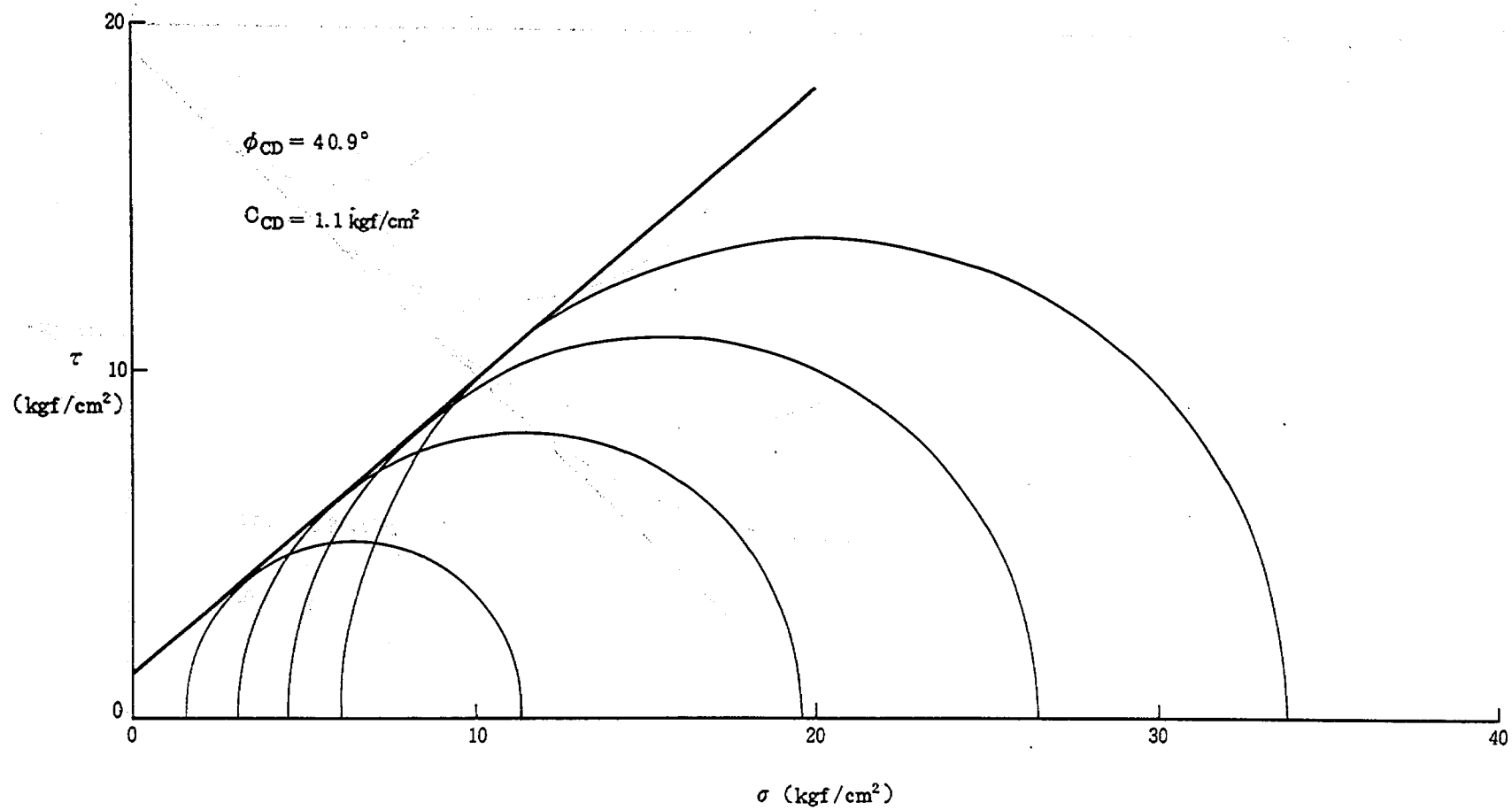


図 - 33 D 30 , $d_{\max} 9.52\text{mm}$ の破壊包絡線

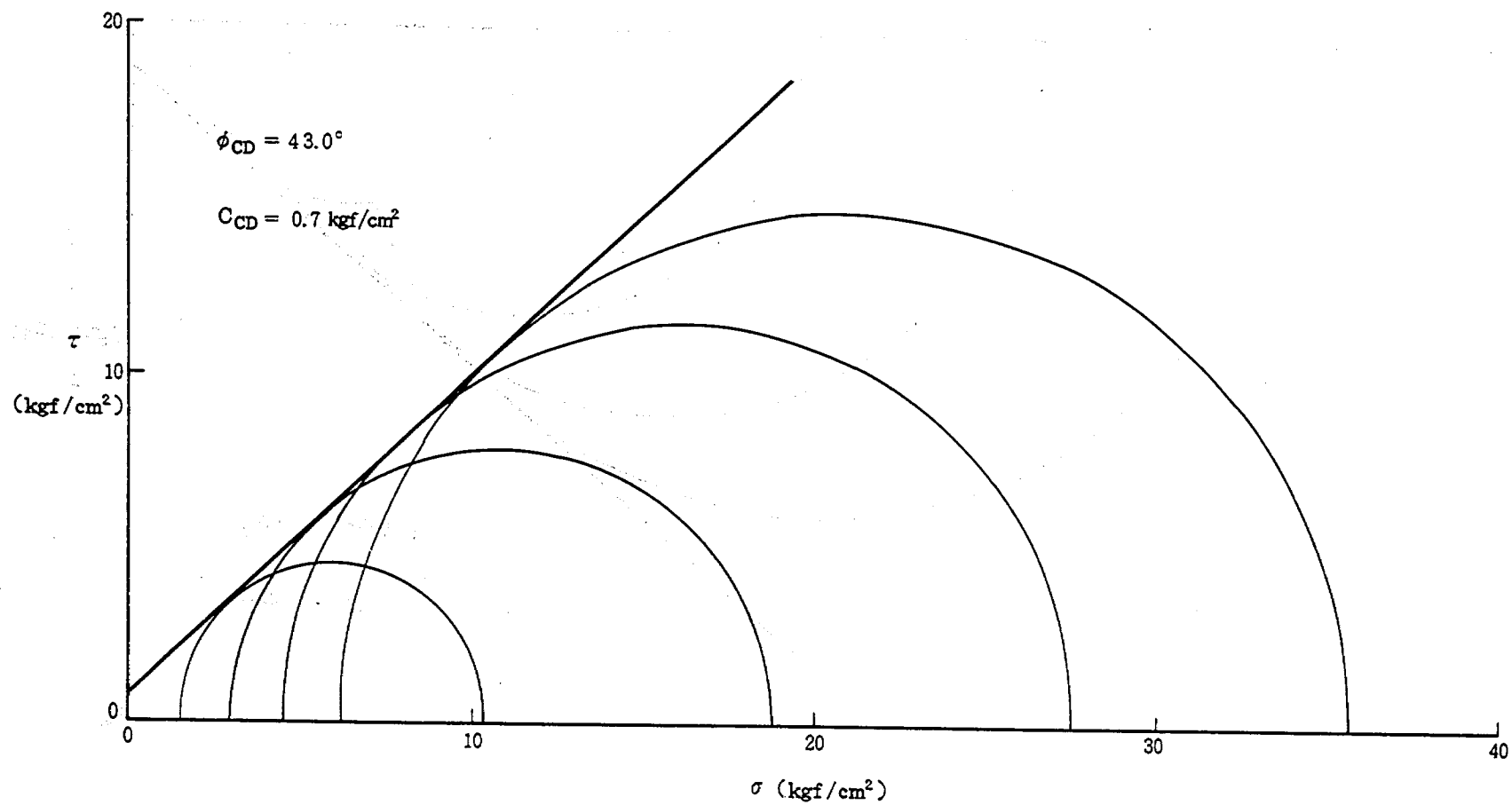


図-34 D30, $d_{\max} 19.1\text{mm}$ の破壊包絡線

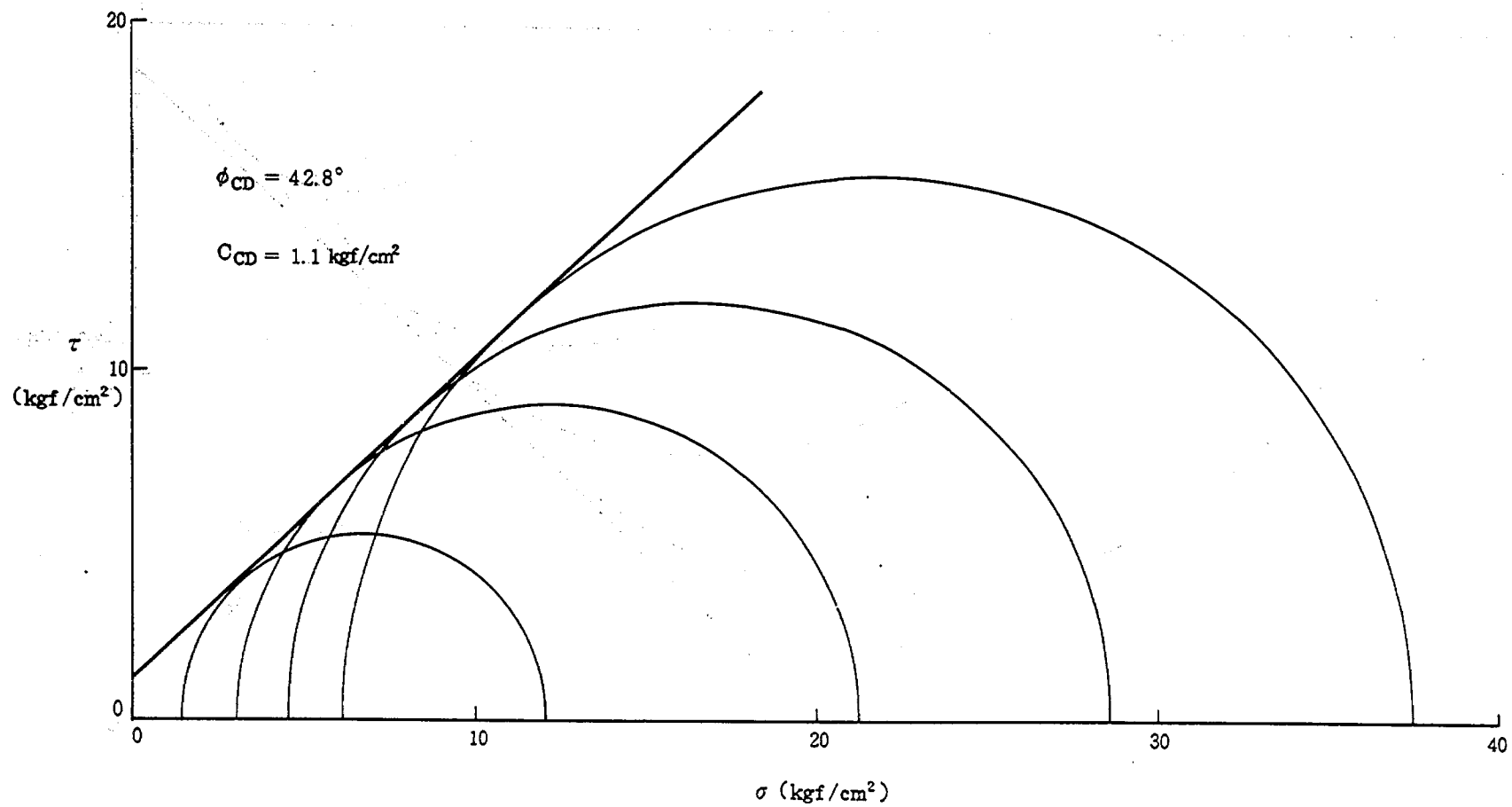


図-35 D 30 , $d_{\max}$ 38.1mm の破壊包絡線

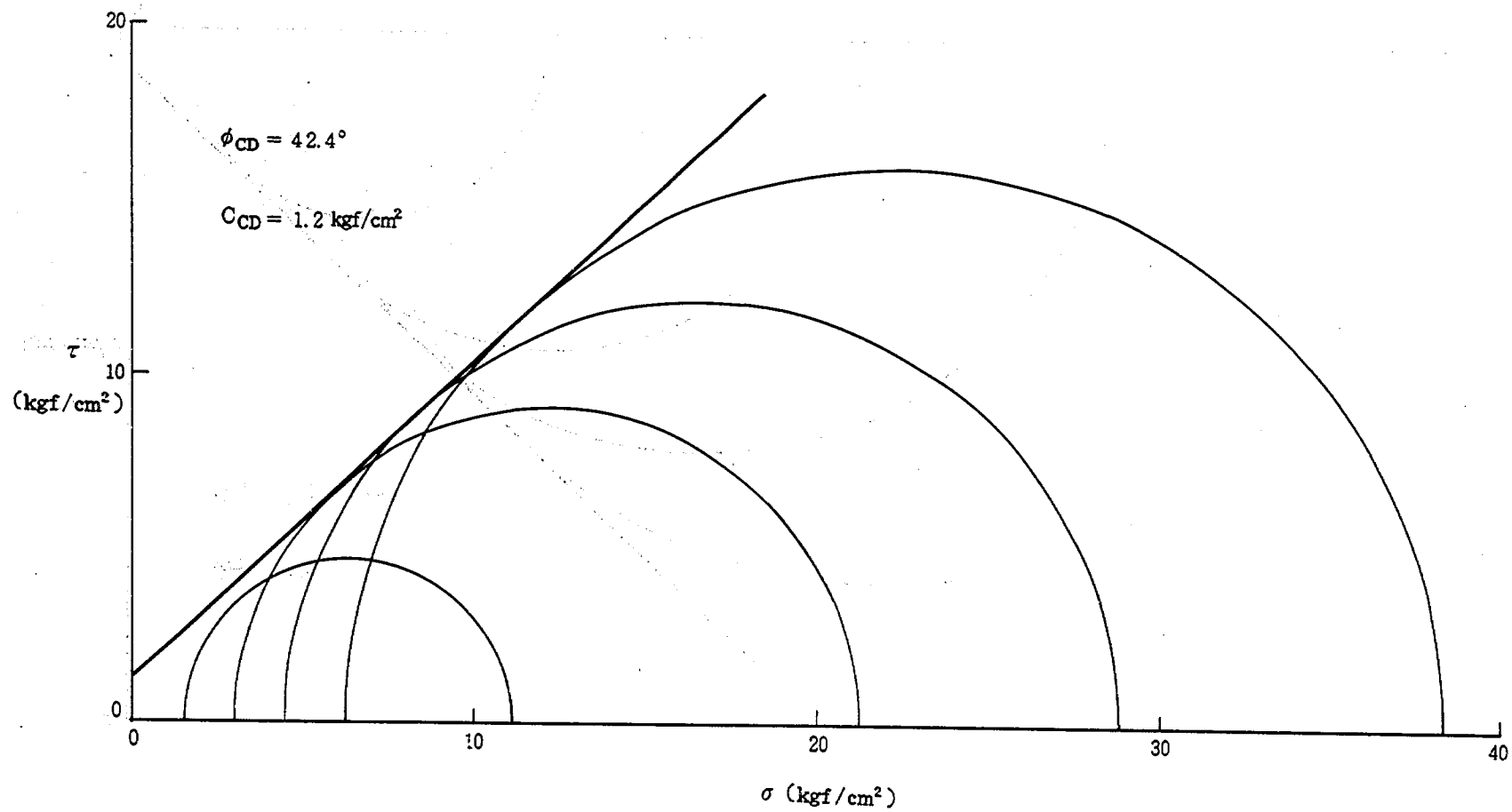


図 - 36 D 30 , $d_{\max} 63.5 \text{ mm}$ の破壊包絡線

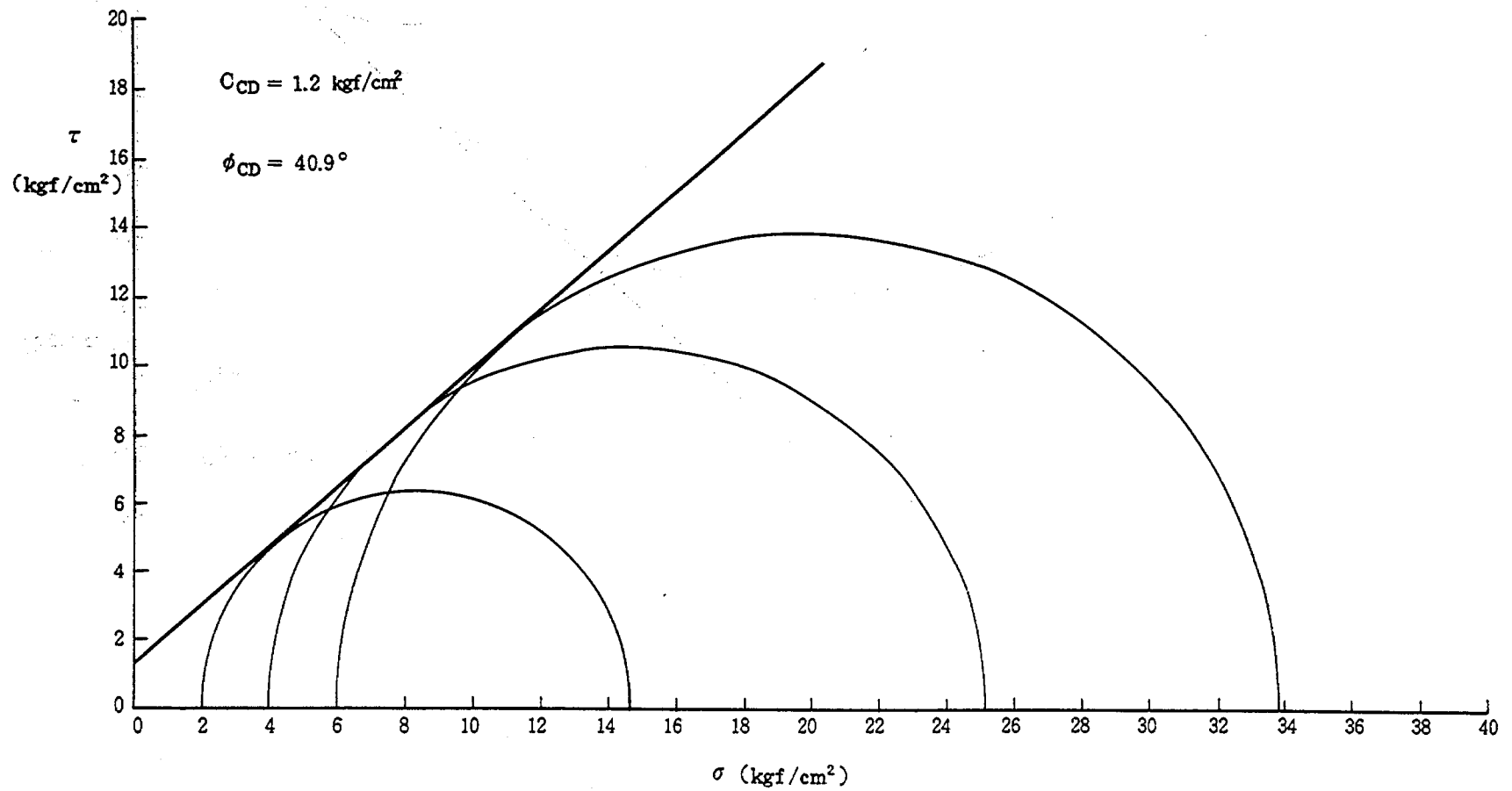


図 - 37 D 50 , $d_{\max} 38.1 \text{ mm}$ の破壊包絡線

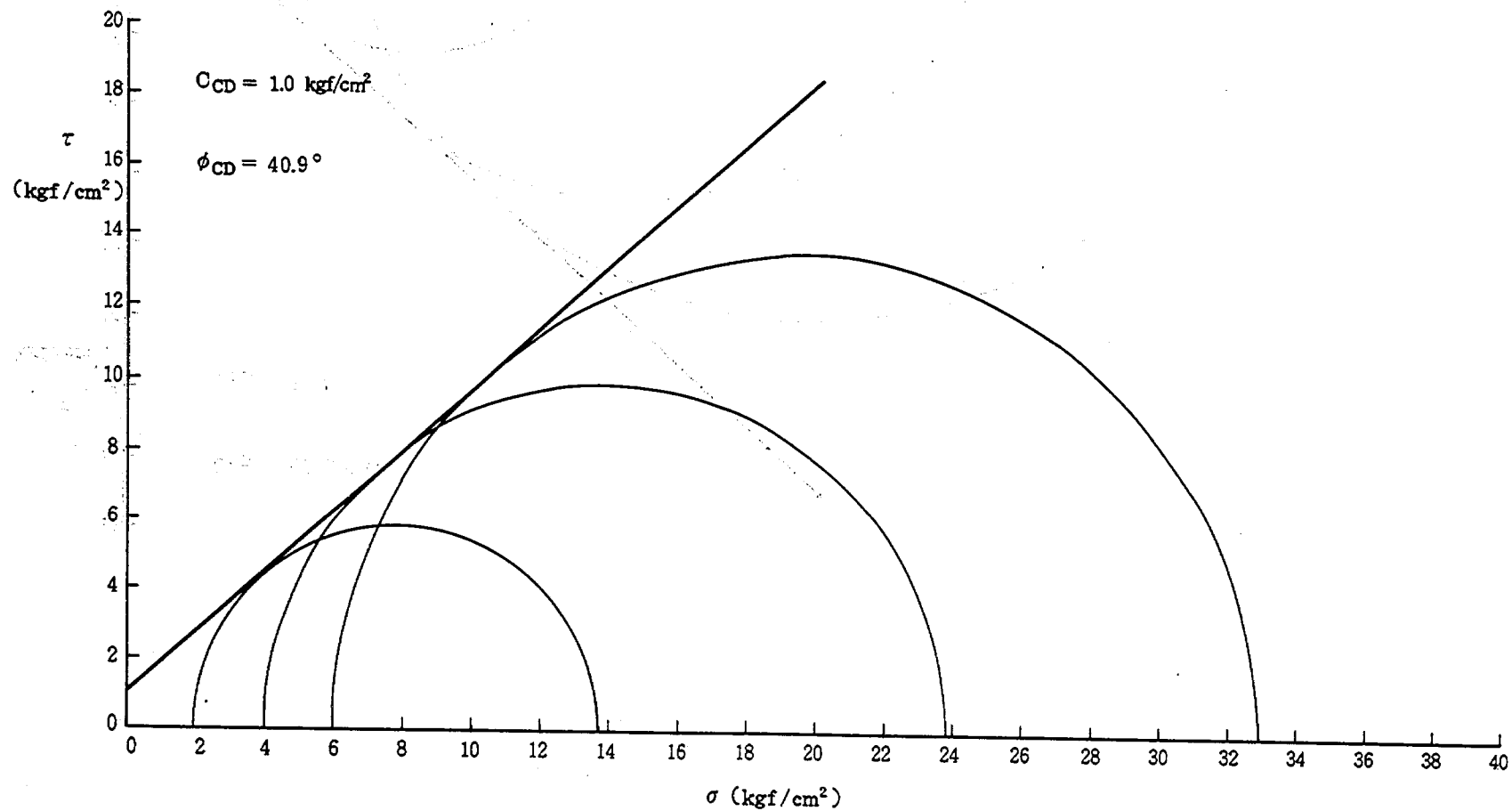


図 - 38 D 50, $d_{\max} 63.5 \text{ mm}$ の破壊包絡線

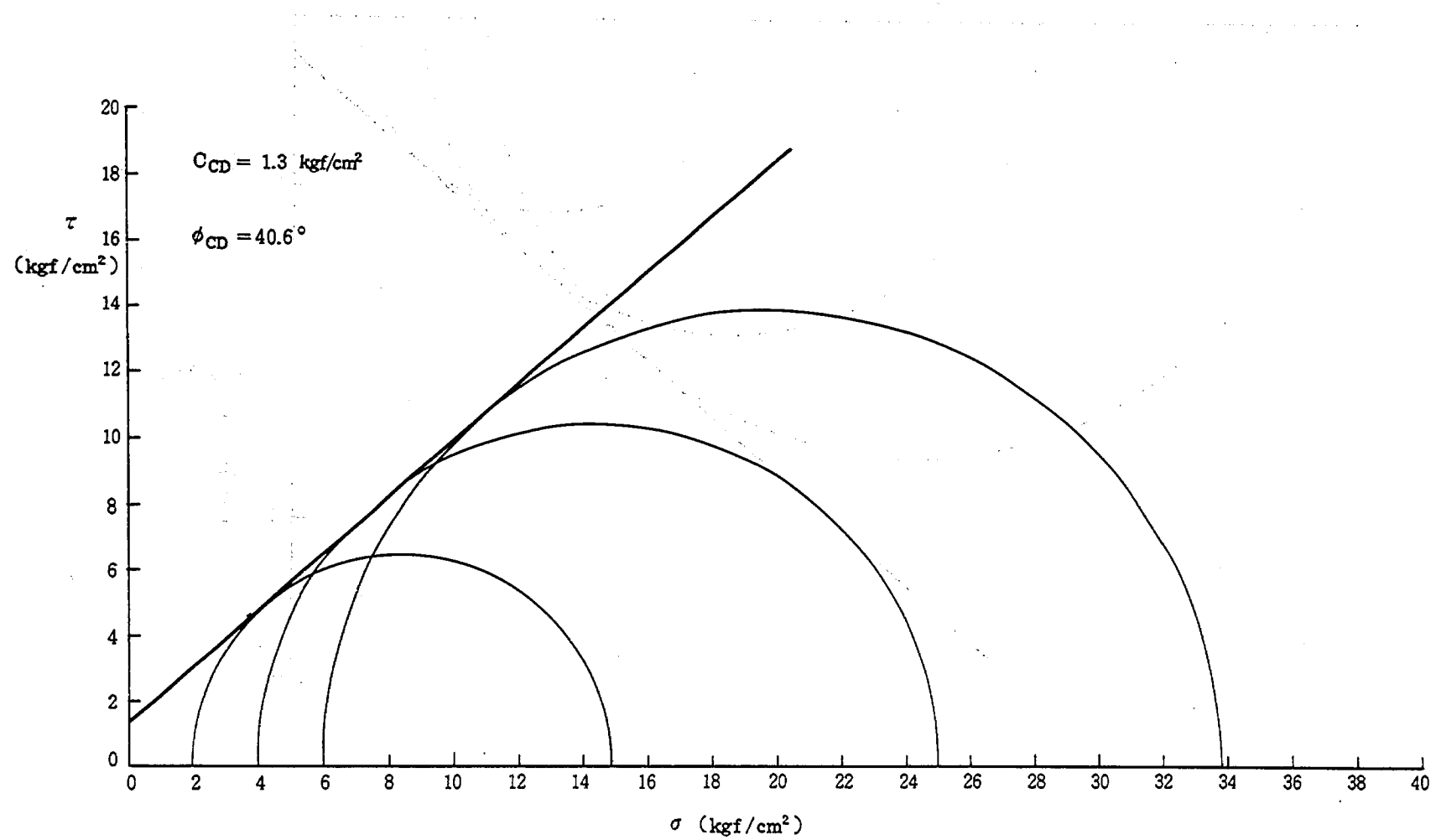


図 - 39 D 50 , $d_{\max} 101.6 \text{ mm}$ の破壊包絡線

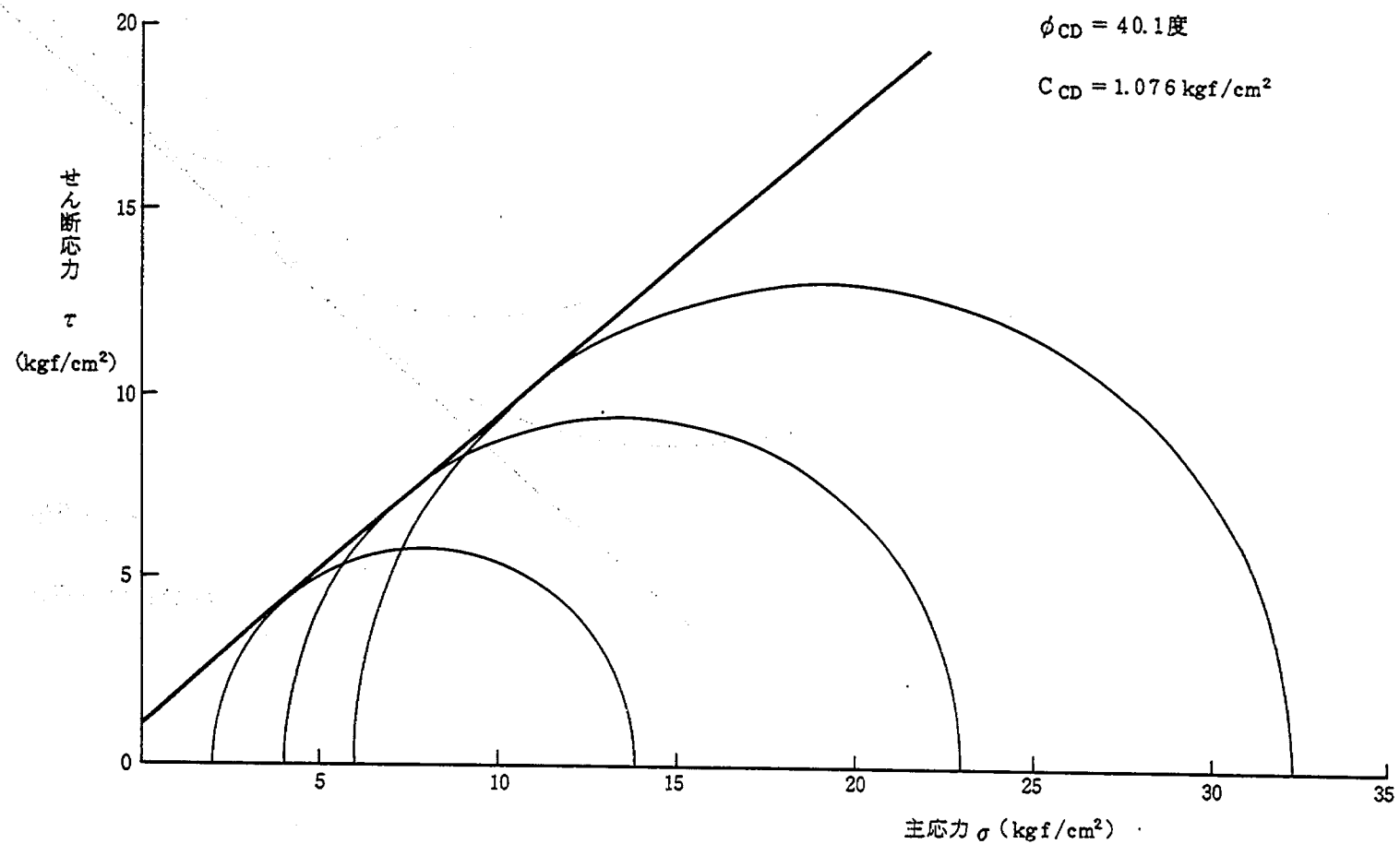


図-40 D 120, $d_{\max} 101.6 \text{ mm}$ の破壊包絡線

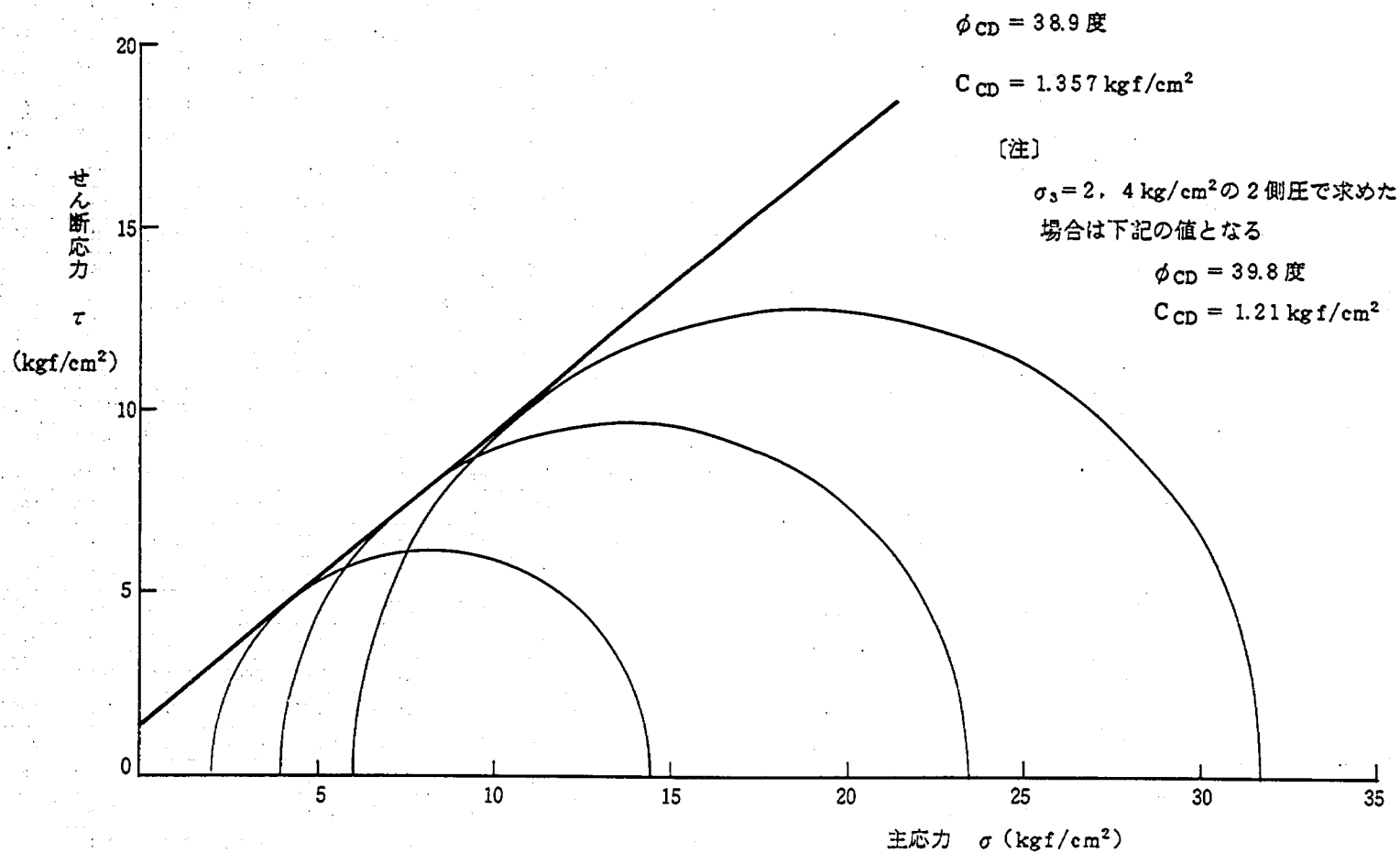


図-41 D 120, $d_{\max}$ 250 mm の破壊包絡線

表-14 三軸圧縮試験結果一覧表

粒度	ケース名	粒子形状 (%)	側圧 σ_3 (kgf/cm ²)	初期乾 燥密度 γ_d (g/cm ³)	間 隙 比			破 壊 時						$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の 50%割線変 形係数 (kgf/cm ²)	初期接線 変形係数 (kgf/cm ²)	初期接線 ポアソン比	三軸後 破砕率 (%)	強度定数		粒 度
					初 期 e_0	圧密後 e_e	破壊時 e_f	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ kgf/cm ²	e_f %	$(\Delta V/V_0)_f$ %	$(\sigma_1/\sigma_3)_f$	ポアソ ン 比	割線変形係 数(kgf/cm ²)					内 部 摩擦角 ϕ (度)	粘着力 c(kgf/ cm ²)	
A	D30- d_{max} 9.52	板状=36 葉状=6 塊状=34 棒状=24	1.5	2.058	0.469	0.442	0.435	9.80	6.33	-0.45	7.5	0.466	150	519	833	0.14	2.7	40.9	1.1	A
			3.1	2.055	0.472	0.420	0.402	16.55	7.28	1.28	6.3	0.412	227	742	1,087	0.11	2.1			
			4.5	2.064	0.465	0.404	0.369	22.01	10.53	2.56	5.9	0.378	209	646	1,000	0.07	3.1			
			6.1	2.057	0.470	0.396	0.351	27.82	10.95	3.38	5.6	0.346	254	881	1,428	0.04	3.0			
B	D30- d_{max} 19.1		1.5	2.054	0.451	0.414	0.392	8.79	5.42	1.55	6.9	0.357	162	314	476	0.12	2.1	43.0	0.7	B
			3.0	2.061	0.446	0.405	0.381	15.76	10.90	1.76	6.2	0.419	144	602	952	0.09	2.7			
			4.6	2.054	0.451	0.386	0.355	23.04	10.17	2.28	6.0	0.388	226	743	1,176	0.07	3.3			
			6.2	2.084	0.452	0.373	0.335	29.48	11.73	3.65	5.8	0.344	251	715	1,176	0.04	4.4			
C	D30- d_{max} 38.1		1.5	2.065	0.443	0.404	0.402	10.56	6.16	0.23	8.0	0.481	171	537	1,053	0.19	2.5	42.8	1.1	C
			3.1	2.052	0.452	0.389	0.374	18.22	8.07	1.10	6.9	0.432	226	692	1,250	0.16	5.4			
			4.6	2.078	0.434	0.366	0.330	24.05	11.39	2.68	6.2	0.382	211	815	1,538	0.12	6.9			
			6.2	2.054	0.451	0.367	0.327	31.30	13.05	2.61	6.0	0.400	240	1,163	2,000	0.08	7.1			
D'	D30- d_{max} 63.5		1.5	2.013	0.480	0.417	0.414	9.62	8.69	0.89	7.4	0.449	111	267	370	0.12	4.5	42.4	1.2	D'
			3.0	2.013	0.480	0.400	0.367	18.67	9.47	2.38	7.2	0.374	197	570	1,053	0.09	5.5			
			4.5	2.005	0.486	0.380	0.347	24.32	12.34	2.44	6.4	0.401	197	856	1,667	0.08	8.0			
			6.2	2.021	0.474	0.377	0.328	32.06	12.52	3.69	6.2	0.353	256	845	2,000	0.05	8.0			
C	D50- d_{max} 38.1	2.0	2.084	0.45	0.437	0.457	12.70	7.0	-1.37	7.4	0.598	181	1,053	1,667	0.27	-	40.9	1.2	C	
		4.0	2.084	0.45	0.435	0.429	21.17	9.0	0.47	6.3	0.474	235	1,047	1,818	0.15	-				
		6.0	2.084	0.45	0.426	0.398	27.82	12.0	2.00	5.6	0.427	232	930	2,041	0.10	9.11				
D	D50- d_{max} 63.5	2.0	2.083	0.45	0.441	0.450	11.78	7.5	-0.63	6.9	0.542	157	1,065	1,470	0.22	-	40.9	1.0	D	
		4.0	2.083	0.45	0.435	0.425	19.86	10.0	0.69	6.0	0.465	199	1,263	2,222	0.15	-				
		6.0	2.083	0.45	0.428	0.383	26.98	14.0	2.79	5.5	0.400	193	757	1,266	0.07	9.25				
E	D50- d_{max} 101.6	2.0	2.083	0.45	0.440	0.463	12.96	8.5	-1.60	7.5	0.595	152	1,338	1,818	0.29	-	40.6	1.3	E	
		4.0	2.083	0.45	0.436	0.426	21.05	9.0	0.74	6.3	0.459	234	1,130	2,000	0.16	-				
		6.0	2.083	0.45	0.429	0.409	27.84	15.0	1.36	5.6	0.454	186	745	1,282	0.13	16.09				
E	D120- d_{max} 101.6	2.0	2.080	0.45	0.437	0.431	11.89	8.22	-1.02	1.95	0.526	145	1,500	2,222	0.30	7.3	40.1	1.1	E	
		4.0	2.081	0.449	0.428	0.383	19.01	10.38	0.68	5.75	0.467	183	1,390	1,923	0.21	10.7				
		6.0	2.081	0.449	0.426	0.345	26.35	11.65	2.07	5.39	0.411	226	1,206	2,000	0.15	12.2				
F	D120- d_{max} 250	2.0	2.082	0.448	0.433	0.451	12.32	11.29	0.11	7.16	0.495	109	736	1,136	0.25	7.7	38.9 (39.8)*	1.4 (1.2)*	F	
		4.0	2.085	0.446	0.419	0.418	19.45	12.66	2.49	5.86	0.402	154	656	1,250	0.16	11.4				
		6.0	2.091	0.442	0.417	0.396	25.84	14.19	4.37	5.31	0.346	182	544	1,053	0.08	14.3				

(註) () * 内の値は $\sigma_3 = 2.4 \text{ kgf/cm}^2$ の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の値を用いて求めた値。

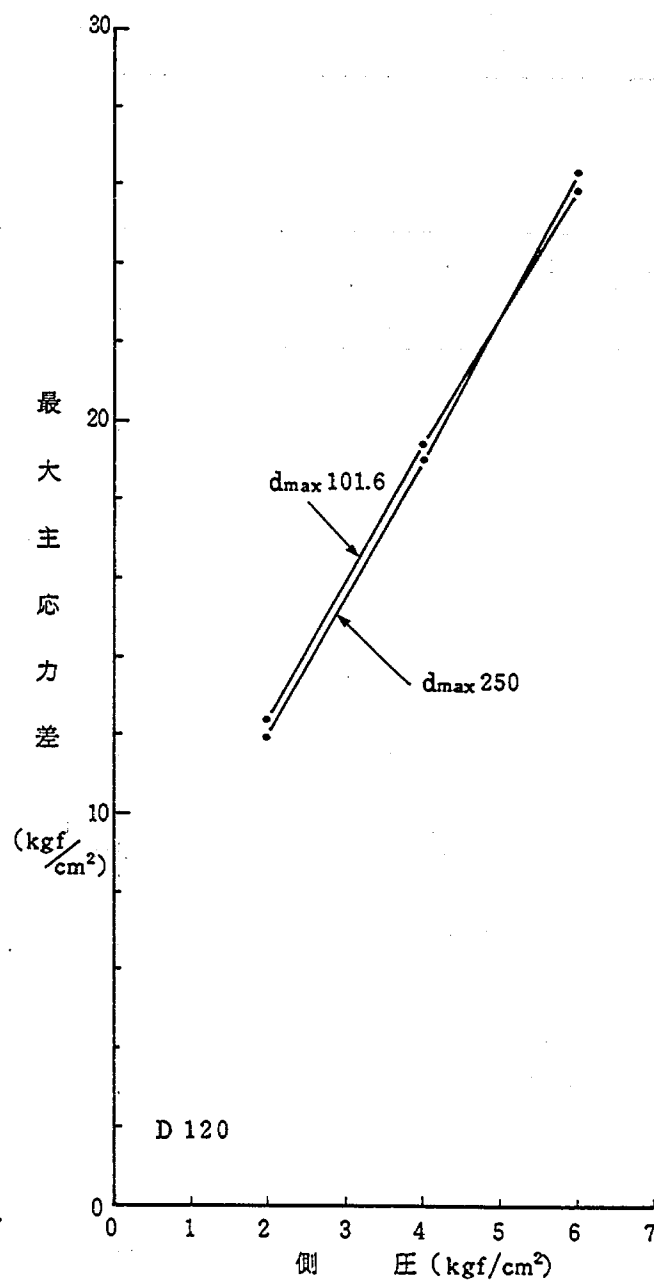
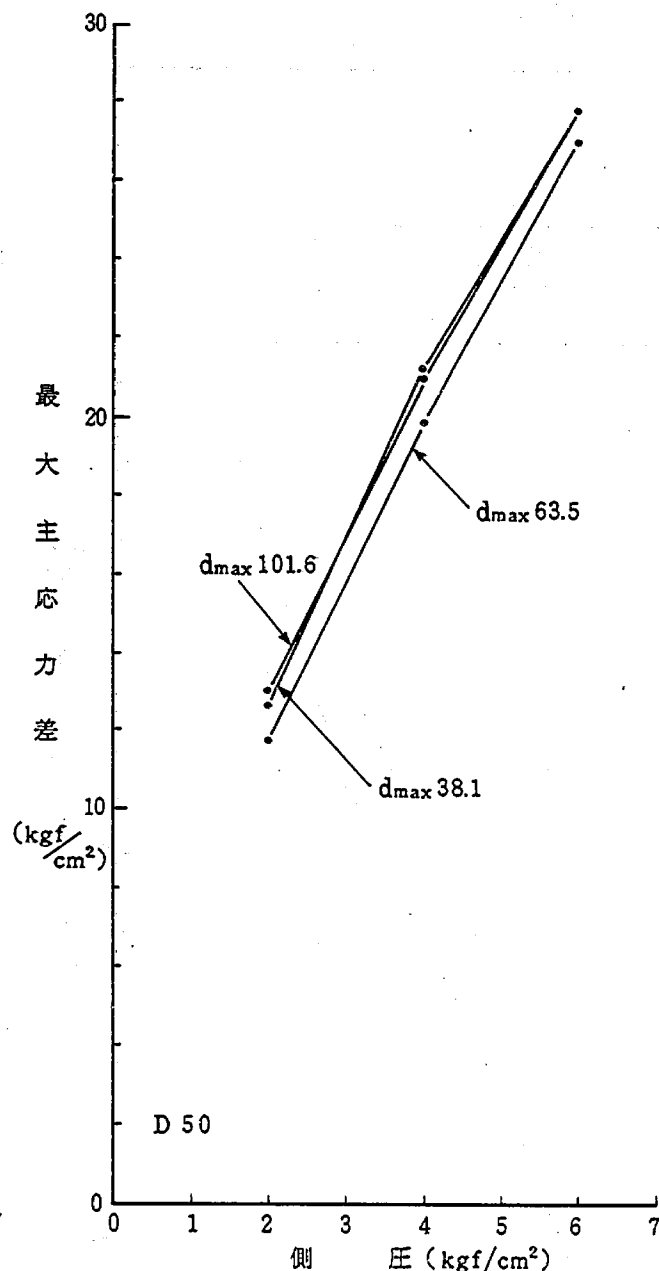
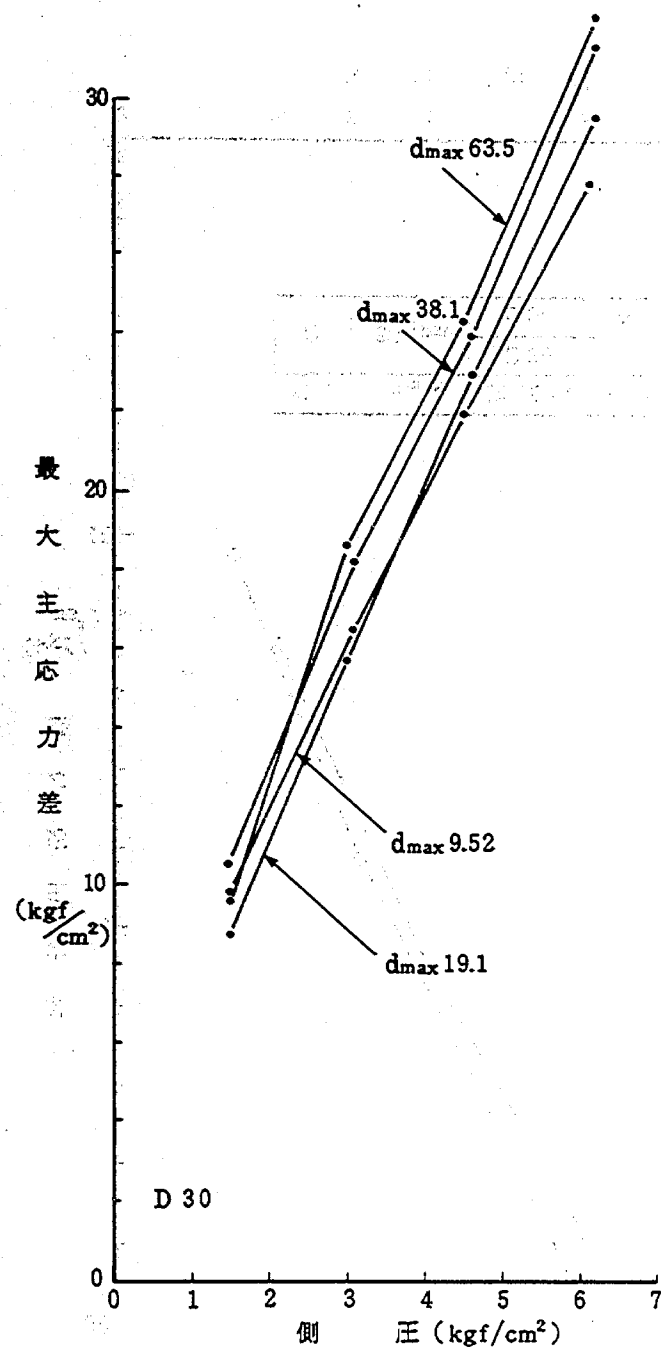


図 - 44 側圧と最大主応力差

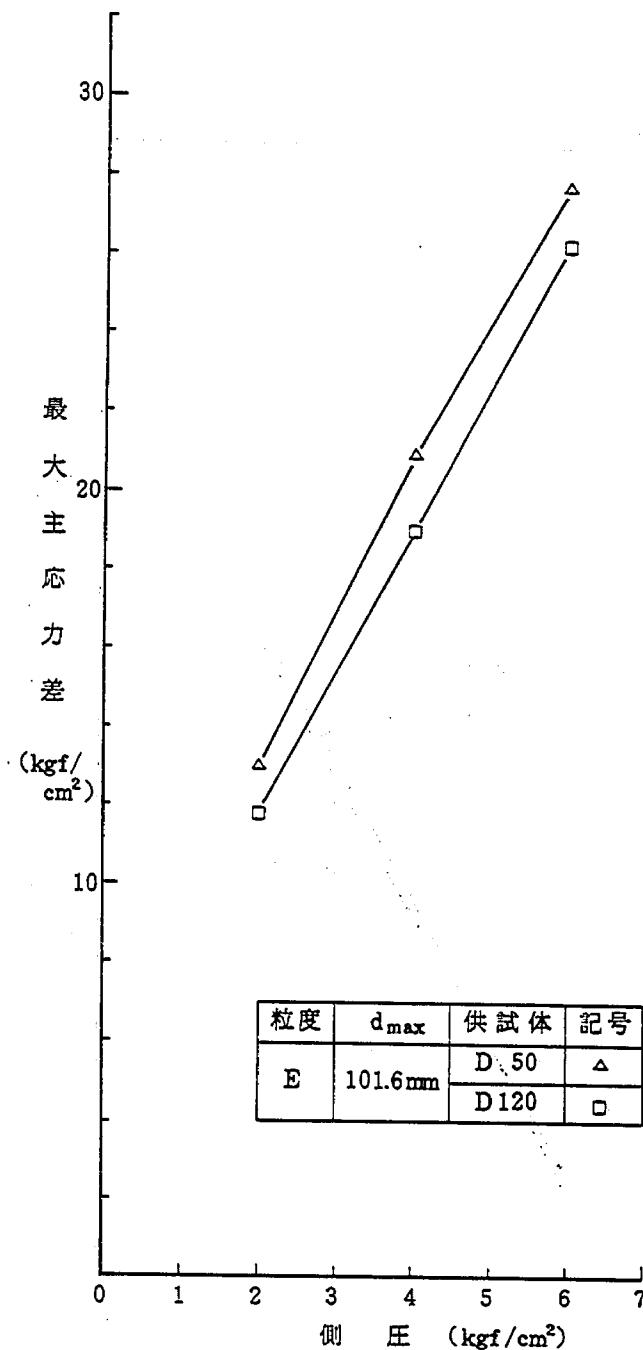
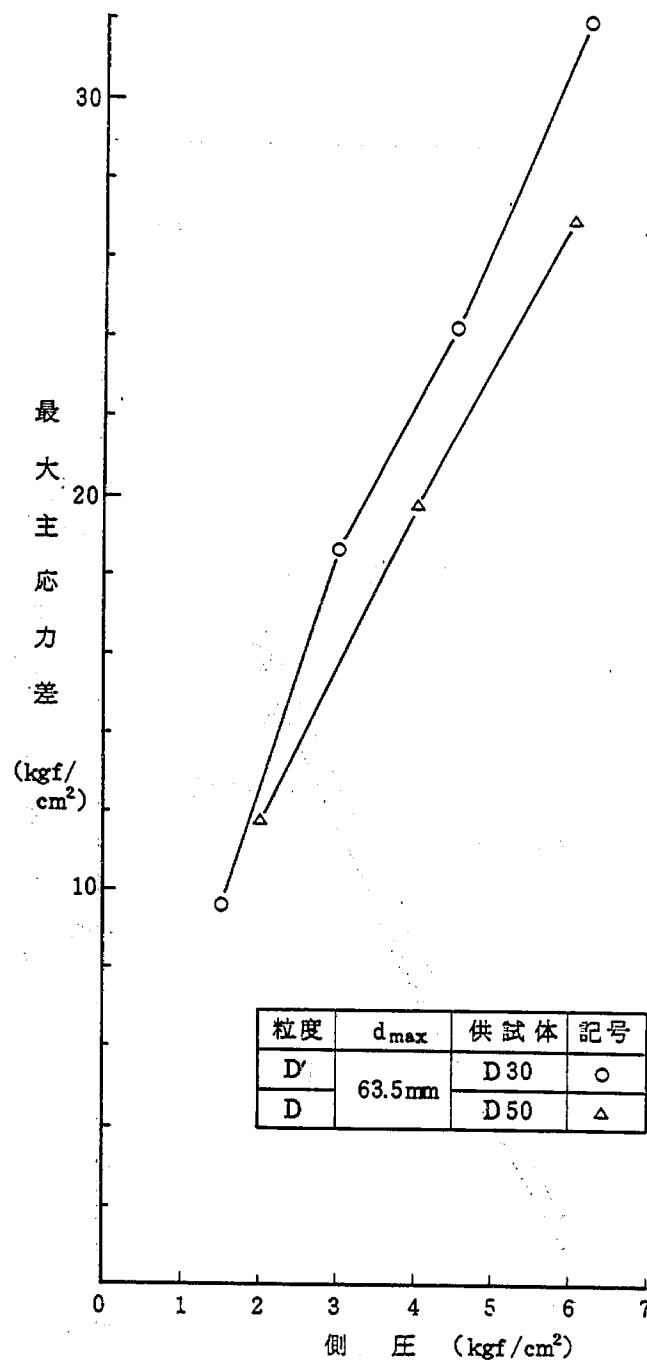
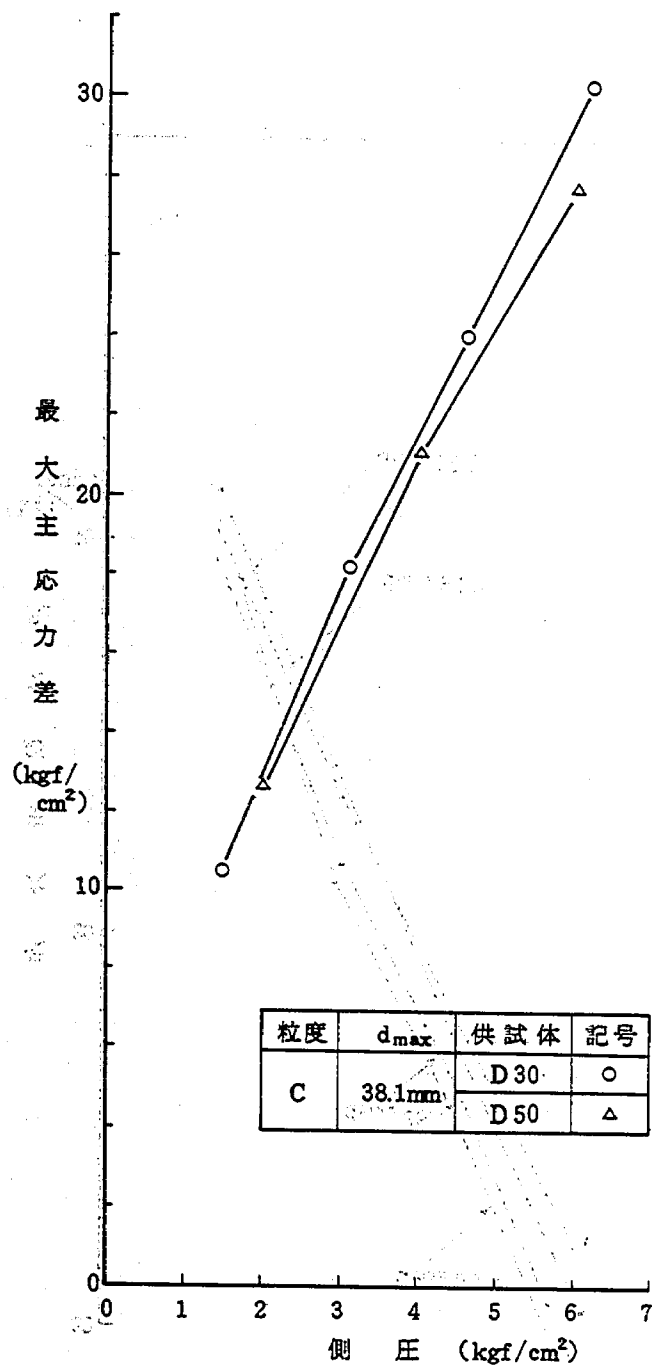


図-45 供試体寸法が異なる状態での側圧と最大主応力差

を60%含有したA粒度($d_{\max}$ 9.52 mm)を除いて42.4, 42.8, 43.0とほぼ一定の値を示している。D 50で得られた値は40.9, 40.9, 40.6度と一定した値を示している。D 120で得られた値は40.1, 38.9度でありF粒度($d_{\max}$ 250 mm)が1.2度小さな値を示しているが、これはE粒度で得られた破壊包絡線は直線であるのに比較してF粒度の場合には破壊包絡線がやや上に凸の曲線形状を示していることによるものである。

同じ粒度で得られた内部摩擦角の比較を表-15に示す。

表-15 供試体寸法と内部摩擦角

粒 度	$d_{\max}$ (mm)	供 試 体	内部摩擦角 (度)		内部摩擦角 の 差 (度) ①-②	粘着力成分 (kgf/cm ²)		粘着力成分の 差(kgf/cm ²) ①-②
C	38.1	D 30	①	42.8	1.9	①	1.1	-0.1
		D 50	②	40.9		②	1.2	
D'	63.5	D 30	①	42.4	1.5	①	1.2	0.2
D		D 50	②	40.9		②	1.0	
E	101.6	D 50	①	40.6	0.5	①	1.3	0.2
		D 120	②	40.1		②	1.1	

内部摩擦角はD 50とD 120に大きな差が現われていないが、D 30とD 50ではD 30の方が1.5~1.9度大きな値となっている。D 30とD 50の試験方法を比較すると大きな相違点として、①供試体の作成方法と、②せん断速度が考えられる。

粘着力成分については、全試験ケースが1.0~1.3 kgf/cm²の範囲にある。

最大粒径と強度定数の関係を図-47に示す。D 30の $d_{\max}$ 9.52 mmを除くと最大粒径が小さなものより大きな方が内部摩擦角が小さくなる傾向が認められる。

以上は、初期供試体密度を一定に作成した供試体は最大粒径および供試体径の影響をどう受けるかという点から結果を整理したものであるが、圧密終了後あるいはせん断開始直前の密度はD 30, D 50, D 120の各々で異なっている。そこで圧密後の供試体間隙比に着目して考察してみる。圧密後の平均間隙比を表-16に示す。

D 30の圧密後平均間隙比はD 50, D 120に比較して小さな値となっている。圧密終了時の供試体間隙比をせん断試験直前の供試体密度状態と考えて内部摩擦角との関係で整理すると図-48のとおりである。図-48より圧密後の供試体間隙比が大きなものより小さな方が内部摩擦角が大きい傾向にある。このことは一般に密度が大きい方が小さいものより内部摩擦角が大きく現われるということに一致している。

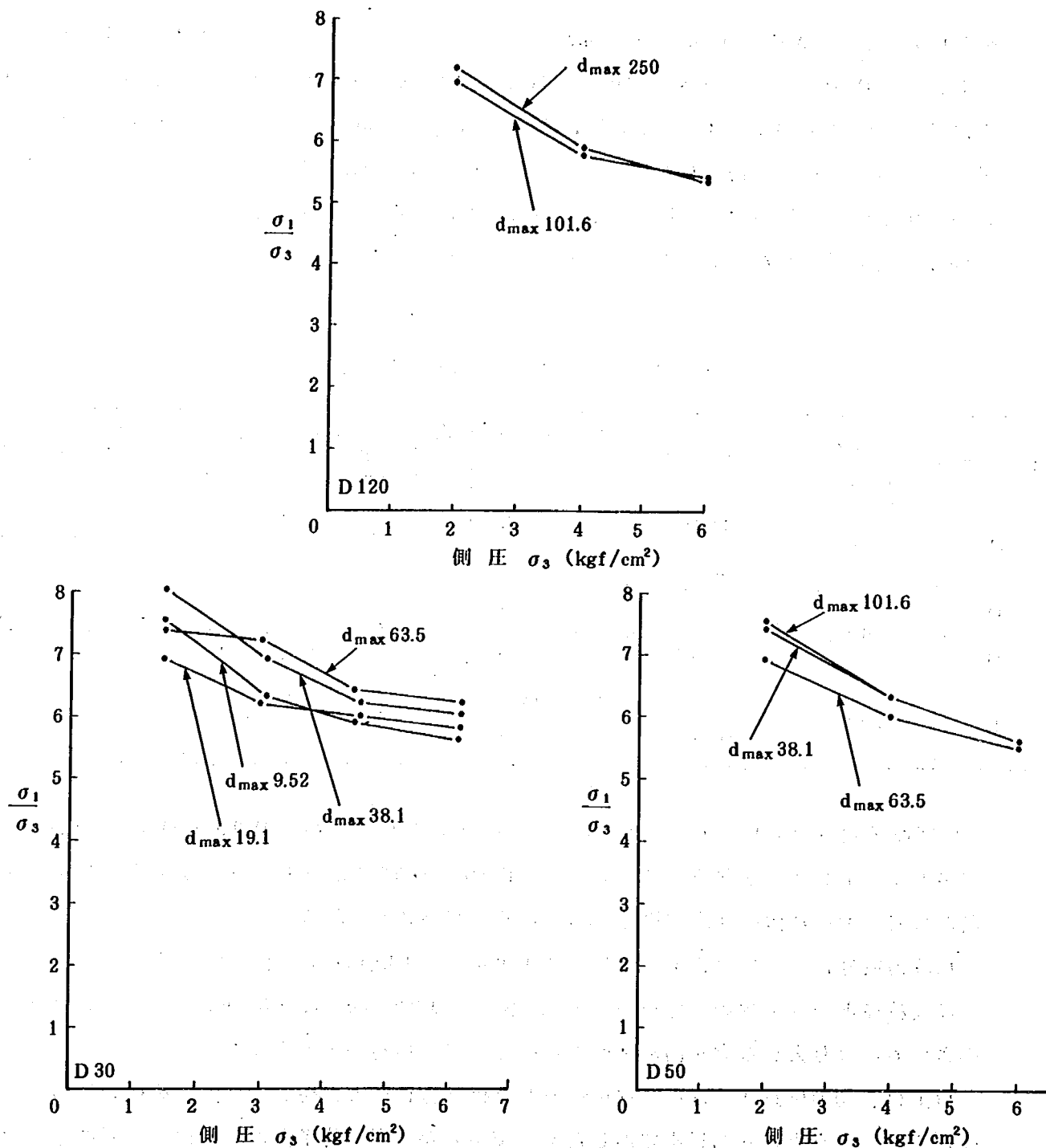


図-46 側圧と最大主応力比

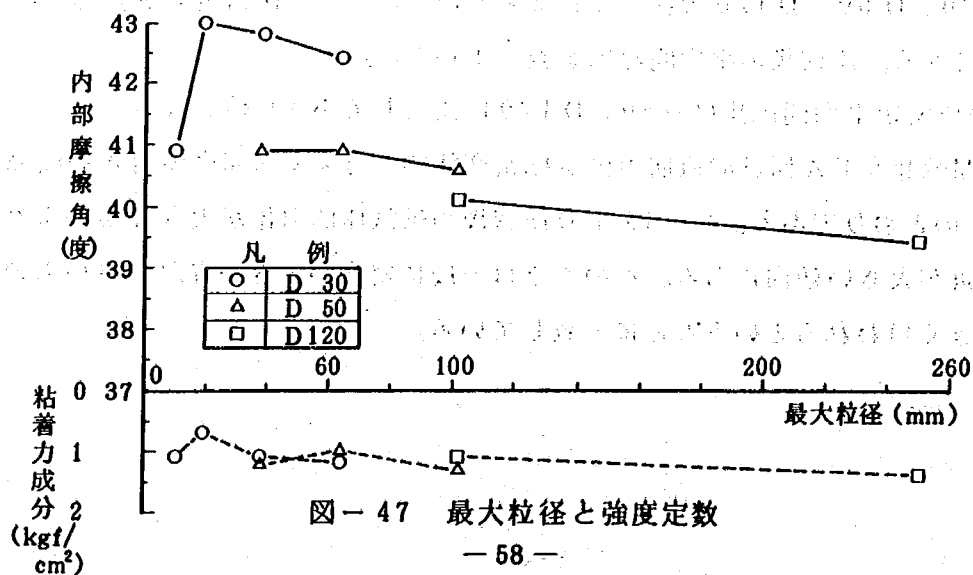


図-47 最大粒径と強度定数

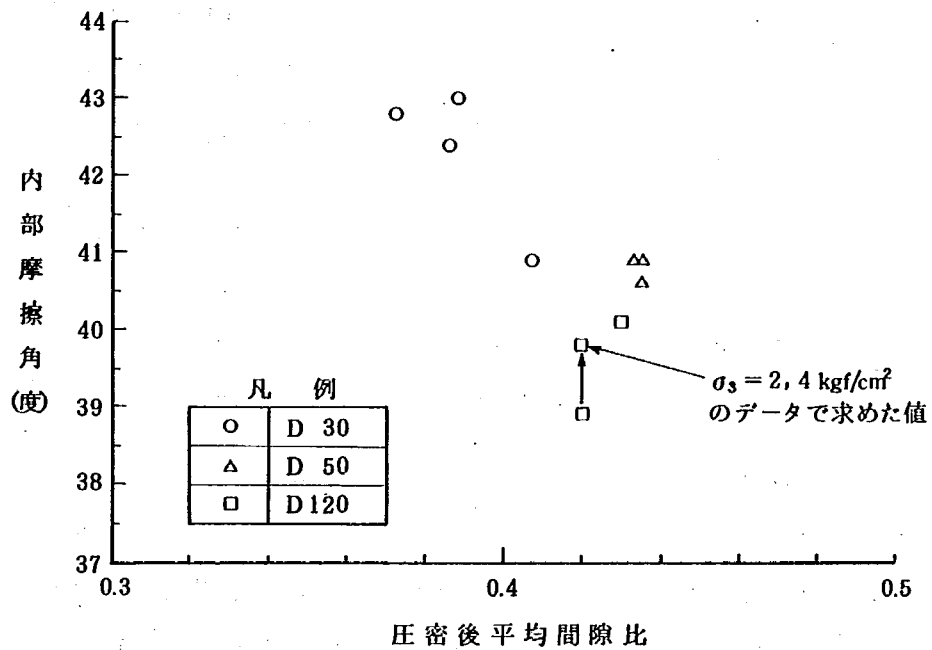


図-48 圧密後間隙比と内部摩擦角

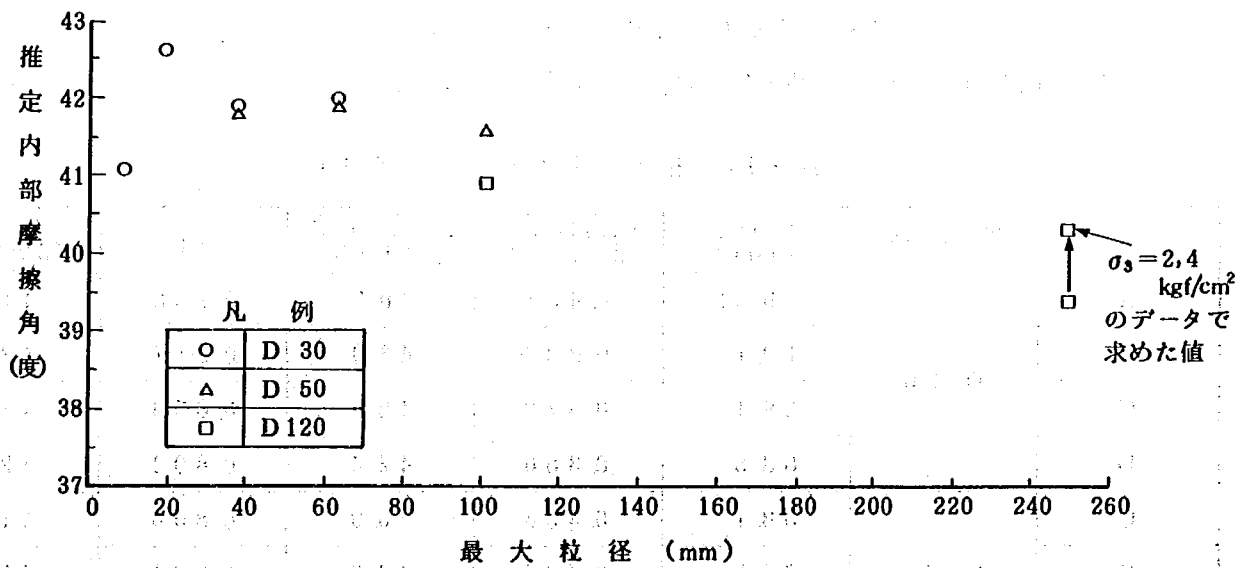


図-49 最大粒径と $e = 0.4$ での推定内部摩擦角

表 - 16 圧密後の平均間隙比

粒 度	供 試 体	d _{max} (mm)	側 圧(kgf/cm ²)	圧 密 後 の 平 均 間 隙 比
A	D 30	9.52	3.1, 4.5, 6.1	0.407
B		19.1	3.0, 4.6, 6.2	0.388
C		38.1	3.1, 4.6, 6.2	0.372
D'		63.5	3.0, 4.5, 6.2	0.386
C	D 50	38.1	2, 4, 6	0.433
D		63.5	"	0.435
E		101.6	"	0.435
E	D 120	101.6	2, 4, 6	0.430
F		250	"	0.420

次に、圧密後の平均間隙比と内部摩擦角のデータから同じ間隙比で期得できる内部摩擦角を推定してみる。推定の方法は最上の間隙比と内部摩擦角の関係⁷⁾を用いることにする。

間隙比と内部摩擦角の関係は次式で与えられている。

$$\sin \phi = \frac{3 k_t}{2 (1 + e) + k_t}$$

ϕ : 内部摩擦角

e : 間隙比

k_t : 三軸圧縮試験より求まる定数

間隙比が 0.4 での推定内部摩擦角の値を表 - 17 に示す。

表 - 17 推定内部摩擦角 ($e = 0.4$)

粒 度	供 試 体	d _{max} (mm)	圧密後平均 間 隙 比	試 験 内 部 摩 擦 角(度)	k _t	e=0.4の推定 内部摩擦角(度)
A	D 30	9.52	0.407	40.9	0.786	41.1
B		19.1	0.388	43.0	0.817	42.6
C		38.1	0.372	42.8	0.803	41.9
D'		63.5	0.386	42.4	0.804	42.0
C	D 50	38.1	0.433	40.9	0.800	41.8
D		63.5	0.435	40.9	0.801	41.9
E		101.6	0.435	40.6	0.795	41.6
E	D 120	101.6	0.430	40.1	0.782	40.9
F		250	0.420	38.9 (39.8)	0.752 (0.770)	39.4 (40.3)

最大粒径と間隙比が 0.4 での推定内部摩擦角の関係を図-49 に示す。図-47 に比較して圧密による供試体の密度変化を考慮して推定した内部摩擦角は図-49 にみられるように最大粒径および供試体寸法の増大に対して一定あるいはほんのわずかな減少の傾向にある。

圧密による供試体の密度変化は側圧の大きさによって異なるため今後、圧密効果の評価方法について検討を加える必要がある。

現実のダムにおける盛立過程を考えると盛立てられた材料は図-50 のようにほぼ主応力比一定で（主応力の方向は変化する）圧密される。その後、現実のダムではすべりが生じるわけではないが、盛立てられた材料のせん断強度はこの状態を基に決定すべきと考えられる。

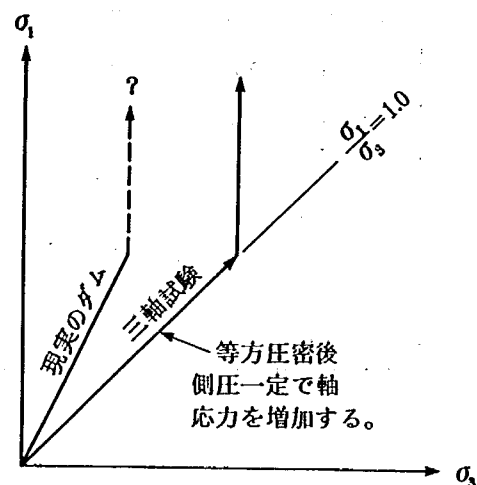


図-50 応力経路の概念

4.3 粒子破碎調査

供試体を構成している粒子がせん断試験によって破碎される現象を粒径別の重量百分率の変化に着目してふるい分けによって調査した。以下に粒子破碎の調査手順を示す。

- ① 試験材料を 0.42, 0.84, 2.0, 4.76, 9.52, 19.1, 25.4, 38.1, 50.8, 63.5, 101.6 mm の木杵網フルイによって粒径別にふるい分ける。250 mm 粒径についてはスケールによって選別する。
- ② ①によって粒径別にふるい分けた材料を試験粒度分布となるように調合して試験材料を作成する。
- ③ ②で作成した材料を所定の密度となるように締固めて三軸圧縮試験の供試体を作成してせん断試験を行う。
- ④ せん断試験後供試体の全試料について①で用いた木杵網フルイによって粒径別にふるい分け、重量を測定する。
- ⑤ ②で作成した時の粒径別重量百分率と④で求められた粒径別重量百分率の差を求める。
- ⑥ ⑤より求められた粒径別重量百分率の差を用いて下記の定義（Marsal の定義⁸⁾）により粒子破碎率を求める。

粒 径 範 囲 (mm)	n	粒度調合した時 の重量百分率 ①	せん断後に測定 した重量百分率 ②	重 量 百 分 率 の 変 化 ② - ①
250 ~ 101.6	1	$P_1 \%$	$P_1' \%$	$\Delta P_1 \%$
101.6 ~ 63.5	2	P_2	P_2'	ΔP_2
63.5 ~ 50.8	3	P_3	P_3'	ΔP_3
50.8 ~ 38.1	4	P_4	P_4'	ΔP_4
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
d_i	i	P_i	P_i'	ΔP_i
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
d_n	n	P_n	P_n'	ΔP_n
				$\Sigma (+\Delta P_i)$
				$\Sigma (-\Delta P_i)$

粒径別の重量百分率の変化量 ΔP_i を粒径別の破砕率とし、 $|\Sigma (+\Delta P_i)|$ または、 $|\Sigma (-\Delta P_i)|$ を全破砕率 (B) と定義する。この方法では、 ΔP_i は必ず負の値となるが、 ΔP_2 以下はその粒径範囲の材料が破砕により減少する分とそれ以上の粒径の材料が破砕しこの粒径範囲のものとなり増加する分があり、 ΔP_2 がその粒径範囲のみ破砕に関係しているわけではない。

D 30, D 50 および D 120 の粒径別破砕率を図-51に示す。D 30 の場合で側圧が 6 kgf/cm² では、最大粒径が小さなものより大きな方が全破砕率が大きく現われている。また、粒径別の破砕率は最大粒径が主に破砕されており、最大粒径が小さなものより大きな方が破砕率が高い。一方、側圧が 1.5 kgf/cm² では全破砕率の大きさは最大粒径によらず一定した破砕率が現われている。また、粒径別の破砕率は最大粒径が主に破砕されている。

D 50 の側圧が 6 kgf/cm² の場合でも全破砕率および粒径別の破砕率の傾向は D 30 と類似しているが、全破砕率の値は D 50 の方が大きく現われている。

D 120 の側圧が 6 kgf/cm² の場合でも全破砕率は最大粒径の大きな方が大きな値が現われている。粒径別では最大粒径が主に破砕している。側圧が 2 kgf/cm² の場合でも全破砕率および粒径別の破砕率の傾向は側圧が 6 kgf/cm² の場合と類似している。

D 30, D 50 および D 120 の粒子破砕の傾向は、最大粒径の小さなものより大きな方が破砕率が高い。破砕は主に最大粒径が破砕されている。また、側圧が小さなものより大きな方が全破砕率が大きく現われている。

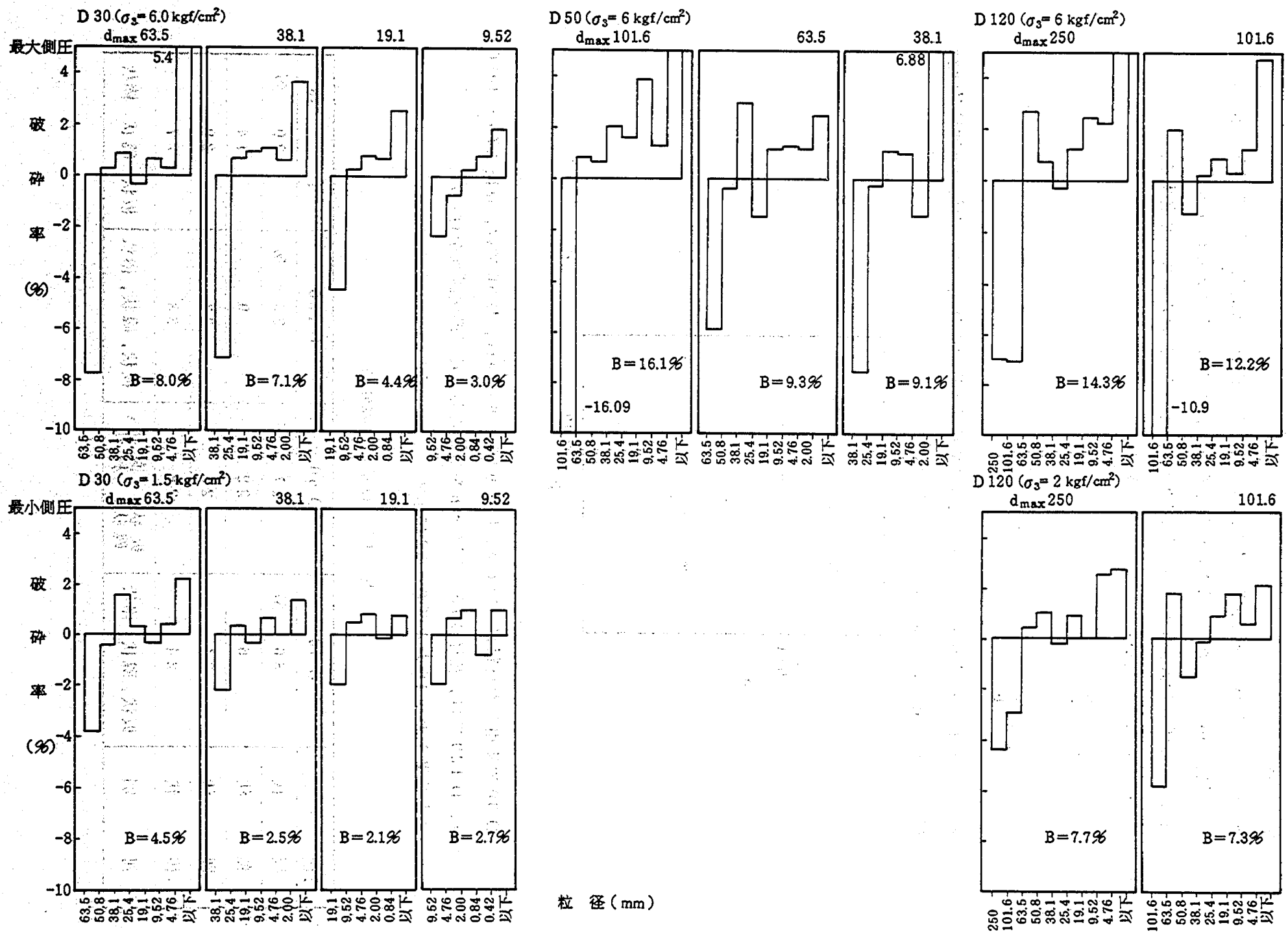


図-51 D 30, D 50 および D 120 の粒径別破砕率

4.4 粒子形状調査

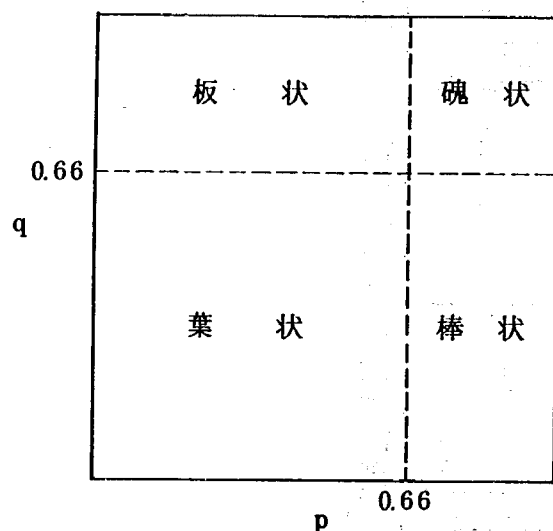
試験材料の粒子形状を分類するための調査を行った。粒子形状調査の手順を以下に示す。

- ① 試験材料の中から調査を行うための粒子を無作為に抽出する（各粒径 5 個以上）。
- ② 抽出した粒子の最大長（a），中間長（b），最短長（c）をノギスで測定する。
- ③ ②で測定したデータから下記の比率を求める。

$$q = \frac{b}{a}$$

$$p = \frac{c}{b}$$

- ④ ③で求められた粒子の q および p の大きさにて粒子の形状を分類する。形状の分類は Zingg の提案している q および p の比率を採用した。



D 30 で使用した材料については，粒径 9.52 ～ 63.5 mm，D 50 では，粒径 4.76 ～ 101.6 mm，D 120 では，粒径 4.76 ～ 250 mm を対象として粒子形状調査を行った。

調査結果を表－18 および図－52 に示す。

表－18 粒子形状の分類

形状	D 30	D 50	D 120	全 体
板 状	36 %	27 %	25 %	30 %
葉 状	6	22	9	14
碗 状	34	23	33	29
棒 状	24	28	33	27
判 別	板状, 碗状, 棒状	板状, 葉状, 碗状, 棒状	板状, 碗状, 棒状	板状, 碗状, 棒状

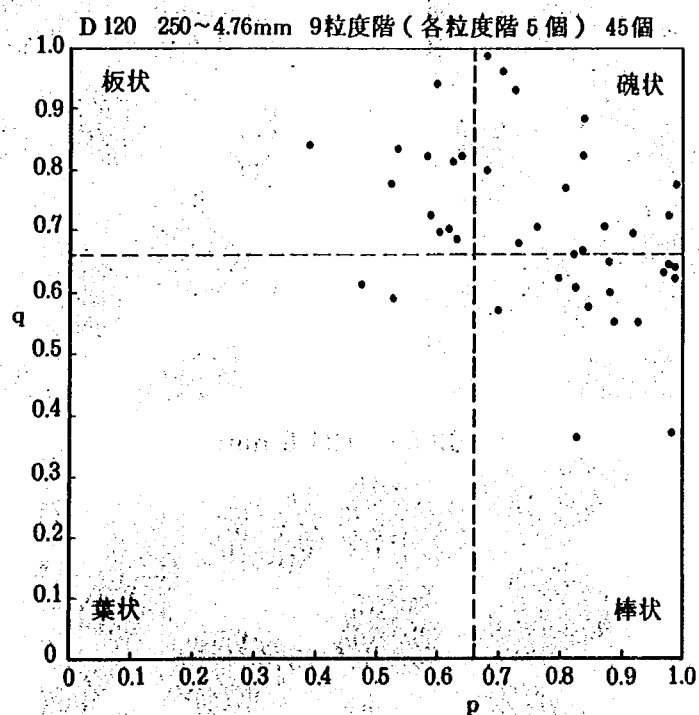
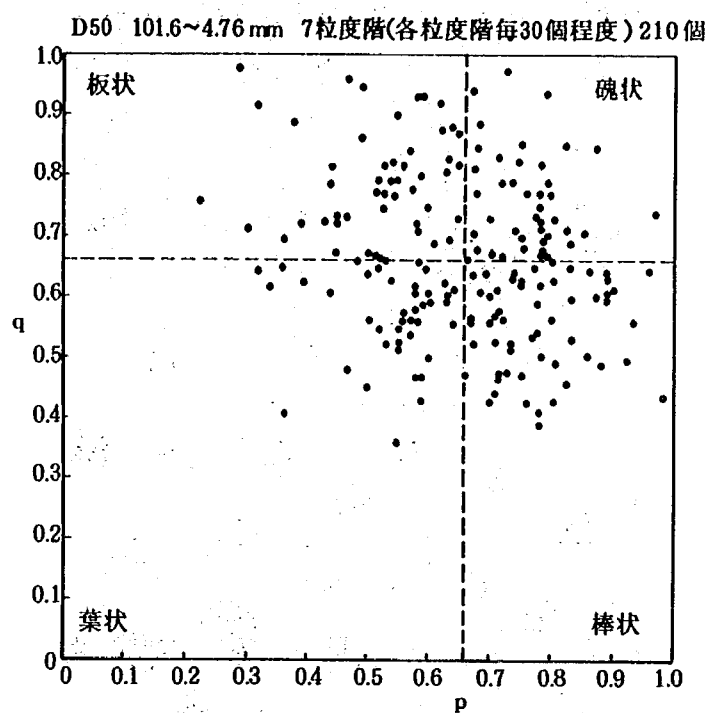
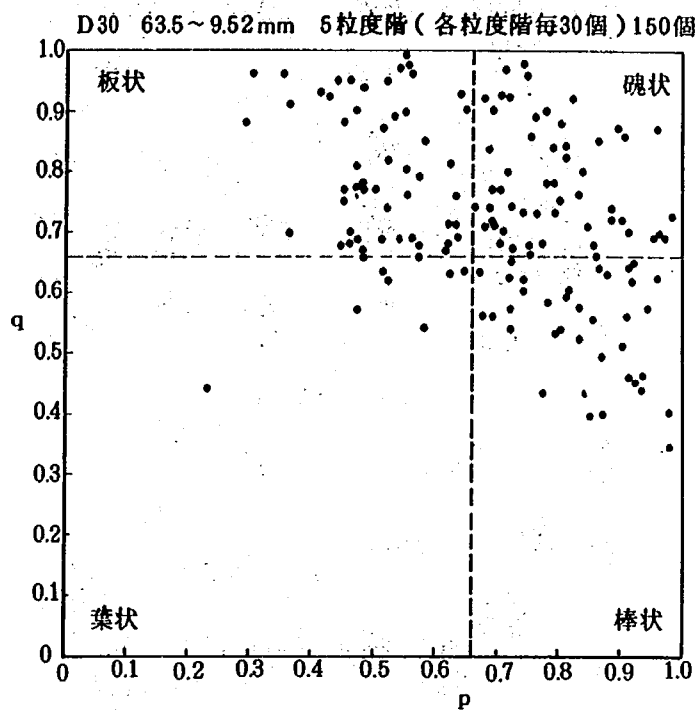
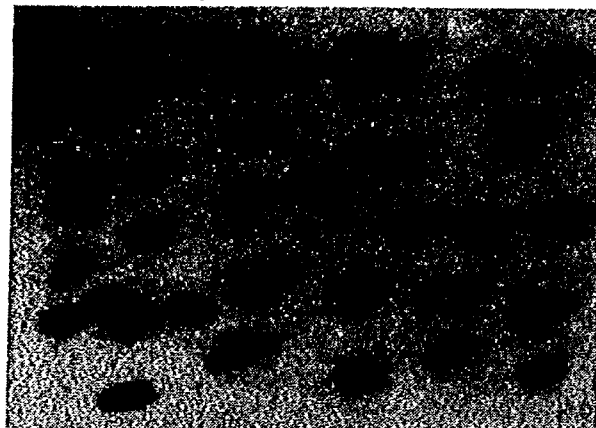


図-52 粒子形状の分布

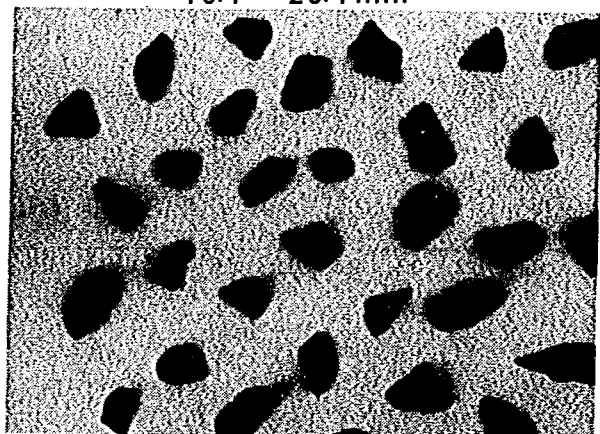
4.76 ~ 9.52 mm



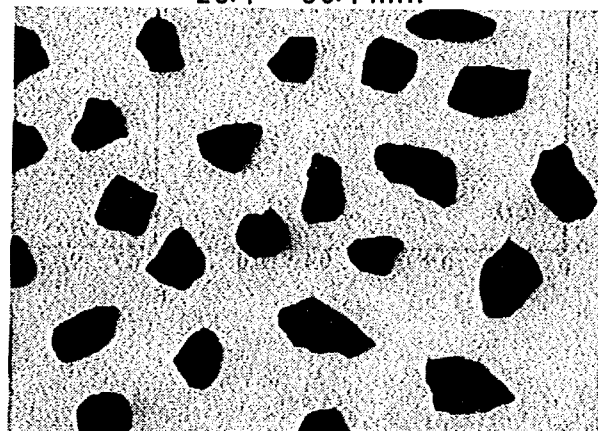
9.52 ~ 19.1 mm



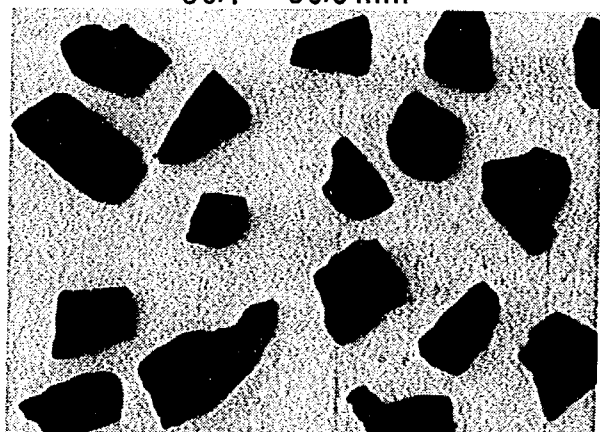
19.1 ~ 25.4 mm



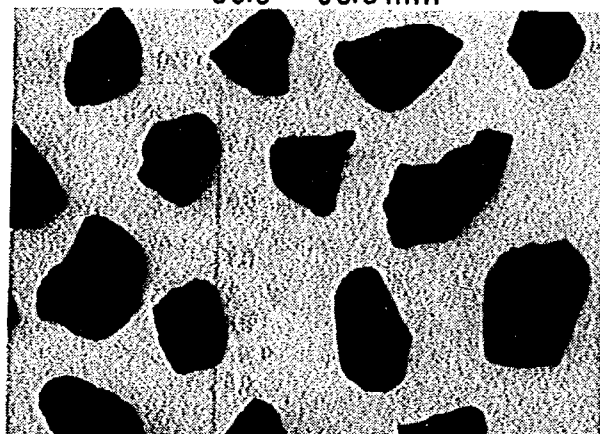
25.4 ~ 38.1 mm



38.1 ~ 50.8 mm



50.8 ~ 63.5 mm



63.5 ~ 101.6 mm

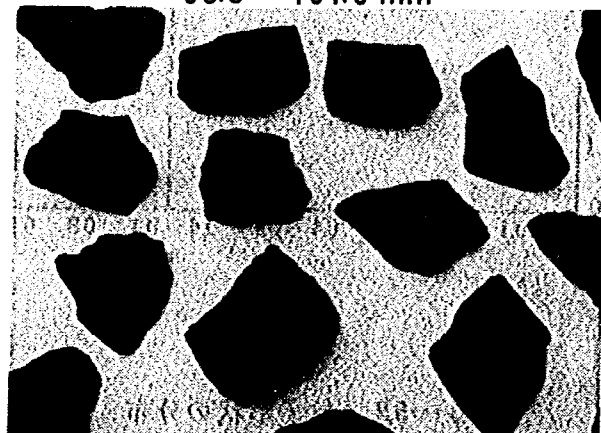


図-53 粒子の外観

表-18より粒子形状としては、板状、塊状および棒状と平均的に含み、葉状がやや少ない。D 30, D 50, D 120とも粒子径によらずほぼ同一の粒子形状の材料であったことがわかる。粒子に黒く着色して撮影したものを図-53に示す。

5. あとがき

ロック材料の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験の要約は下記のとおりである。

- (1) 試験材料として堅硬な材料を使用した。
- (2) 試験粒度組成は均等係数が6の比較的貧粒度である。
- (3) 試験粒度分布条件は相似粒度分布である。
- (4) 供試体の初期間隙比を同じにした。
- (5) D 30, D 50およびD 120の三軸圧縮試験機は異なる試験装置である。
- (6) D 30, D 50およびD 120の供試体作成時の締固め方法はそれぞれ異なる。
- (7) D 30, D 50およびD 120のせん断変位速度は異なる。

試験結果のまとめを以下に示す。

- (1) 相似粒度分布、同一間隙比および最大粒径が供試体直径の1/5以下である条件を満足すれば供試体および最大粒径の大きさの影響が少なく安定したせん断強さを求めることができるものと考えられる。このときの間隙比は圧密後せん断開始直前の供試体密度によって評価した場合である。

しかし、圧密後の供試体密度は圧密圧力の大きさによって異なるから同一密度の設定方法について検討が必要である。

- (2) 本比較試験で大きく異なる点は、供試体の作成方法とせん断速度の2点である。内部摩擦角に対しては前者がより大きく影響し、後者の影響は少ないことが予想されるが、今後実験により確める必要がある。
- (3) 現場粒度分布をそのまま相似粒度分布として室内試験粒度分布とすると、細粒分（たとえば4.76 mm以下のもの）を多く含む場合がある。このときは相似粒度分布は必ずしも好ましくなく、試験許容最大粒径以上を除いた粒度分布とした方が良い場合がある。この点についても検討を加える必要があると考える。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：土質試験法，pp. 495～536，1979
- 2) 粒子形状についてまとめたものとして，
最上武雄編：土質力学，pp. 896～904，技報堂，1969
- 3) Kondner R.L. : Hyperbolic Stress-Strain Response; Cohesive Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 89 No. SMI, 1963
- 4) Janbu, N: Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests, Proceedings, European Conference on Soil Mechanics & Foundations Engineering, Vol. 1, pp. 19～25, 1963
- 5) Kulhawy F.H., Duncan J.M., Seed H.B. : Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Embankments during Construction, Report No. TE-69-4 to U.S. Army Engineers, Waterways Experiment Station, Univ. of California, 1969
- 6) 土質工学会：土質試験法，pp. 520，1979
- 7) 最上武雄編：土質力学，pp. 998～1032，技報堂，1969
- 8) R. J. Marsal : Mechanical Properties of Rockfill. Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, pp. 130～132, 1972

ロック材料の最大粒径に
着目した三軸圧縮比較試験

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第 1788 号

昭和 57 年 3 月 (1982)

松本徳久, 渡辺和夫, 小川 優

キーワード ロック材料, 大型三軸圧縮試験

要 旨

ロック材料のせん断強さを精度良く与えてくれる供試体直径と最大粒径を求めるため, 供試体直径および最大粒径を変化させて行った三軸圧縮比較試験結果をとりまとめたものである。



郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十円切手
をはって下
さい

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所
ファイルダム研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第1788号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印