

ISSN 0386—5878

土研資料 第2006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・その2

昭和58年 6 月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © 1983 fiscal year 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・その2

昭和58年6月

建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室

松 本 徳 久

渡 辺 和 夫

村 上 清 基^{*}

* 現在、飛鳥建設(株)技術研究所

昭和57年4月～昭和58年3月の間

(財)土木研究センターからの部外研究

員として在籍

目 次

1. ま え が き	1
2. ロック材料の最大粒径がせん断強度に及ぼす影響に関する 既往の研究について	2
3. 最大粒径を変化させた相似粒度ロック材料の三軸圧縮 比較試験	9
3.1 試 験 目 的	9
3.2 試 験 方 法	12
3.3 試 験 結 果	26
4. 結 論	61
参 考 文 献	62
付 図 集	63

1. ま え が き

我が国では、1960年代初期の頃からダム高が100 m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。そして、ロックフィルダムの安全で合理的かつ経済的な設計が重要となっている。ロックフィルダムのすべり破壊に対する安定解析手法として規準化されているものは、円弧すべり面法¹⁾であり、これに必要な材料の土質定数は、単位体積重量、せん断抵抗角および粘着力成分である。この解析手法によると、ロックフィルダムの安定法面勾配は、ロック材料のせん断抵抗(強度)に大きく支配される。また、法面勾配の相違は、ダム高が高くなればなるほどロック材料の所要量に影響する。ここで、ロック材料の粘着力成分は、余裕として通常無視されるため、せん断抵抗角が重要な設計値となる。この設計値の選定には経験的要素も含まれるが、選定の基となるのは使用される材料のせん断試験結果である。このように、ロック材料のせん断試験結果は、ロックフィルダムの安全性と経済性に大きな影響を与えるため、いかにして試験値としての精度を向上させるかが重要であると考えられる。

ロック材料のせん断試験としては、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²⁾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な点が多い。

本報告書は、ロック材料の強度に影響する諸因子のうち特に大きな問題となっている最大粒径がせん断強度に及ぼす影響について、S56年度³⁾に引続き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。

三軸試験機は、供試体直径が10, 30 cmと2種のものを使用し、圧密後の間隙比に着目して試験している。なお、せん断速度および供試体端面処理がせん断強度に及ぼす影響についても検討を加えた。本報告書を取りまとめるに当っては、供試体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. ロック材料の最大粒径がせん断強度に及ぼす影響に関する既往の研究について

異なる最大粒径で、相似な粒度に調整されたロック材料のせん断特性については、多くの研究報告がある。最大粒径がロック材料せん断強度に及ぼす影響について検討する場合、細かい数値まで問題となる。したがって、ロック材料のせん断強度に影響する他の因子についても十分検討する必要がある。そこで、ロック材料のせん断強度に影響する諸因子について整理すると以下のようなだろう。⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾

ロック材料の強度特性に影響する因子は

I. 材料の種類及び状態に関する因子

II. 総合的な試験の精度に関する因子

に大別できるものと考えられる。

I. 材料の種類及び状態に関する因子

1. 粒子（鉱物）自体の強さ — 粒子破碎に影響
2. 表面組織（粗度）
3. 粒子形状
4. 粒度（粒度分布及び粒径）
5. 密度（間隙比と相対密度）
6. 含水状態

II. 総合的な試験の精度に関する因子

ここでいう総合的な試験の精度とは、ロック材料の強度試験において、室内試験の条件を実物ダムが置かれている条件にいかに近づけるかという問題であり、これは、次の2つに大別できよう。

A. 試験自体の精度—室内試験自体がもつ精度をいかにして所要のものとするか

B. 試験と実物（現場）との対応上の精度—室内試験の条件・手法等をいかにして現場の状態に対応させるか

A. 試験自体の精度

1. 試験機の機構が強度を求める上で仮定している理想的な応力条件に比しての精度。
 - a. せん断の方式
 - b. 供試体の形状
 - c. 供試体の境界条件
2. 試験機の測定上の精度
 - a. 荷重（応力）
 - b. 変位（歪）
 - c. 間隙水圧
 - d. 体積変化
3. 供試体の精度
 - a. 供試体の大きさ、密度等の精度

- b. 供試体の作成の精度（均一さなど）
- B. 試験と実物（現場）との対応上の精度

1. 実ダムのせん断破壊（実在するかどうかは別）

機構との対応上の精度

- a. せん断機構 — 機種（三軸、一面、単純、平面ひずみなど）
- b. 応力条件（応力履歴を含む）
- c. 排水条件
- d. せん断速度
- e. 振動の影響

2. 供試体と実ダムの真の要素の対応上の精度

- a. 粒度、最大粒径
- b. 密度、相対密度
- c. 締固め方法
- d. 含水状態
- e. 粒子の配列構造
- f. 試料の代表性

上記のロック材料の強度特性に影響を及ぼす諸因子を考慮しながら、最大粒径がロック材料せん断強度に及ぼす影響に関する既往の研究について文献を調査し、その主なものをまとめて表-1に示す。これによると、最大粒径の広い範囲にわたって実施した研究はほとんどないようである。また、各研究において、試験装置、試験材料、供試体作成方法および三軸圧縮試験方法等に相違点があり、最大粒径がせん断強度に与える影響は、それぞれ異なった傾向を示している。

表-1 最大粒径がせん断強度に及ぼす影響に関する既往の研究(その1)

文 献 項 目	岩 屋 ダ ム ⁸⁾	野田(神戸大)他 ⁹⁾	酒見(フジ工業)他 ¹⁰⁾	Marachi, Chan, Seed, Duncan ⁷⁾			水野, 大蔵, 貞弘 ^{11) 12)}	
				小 型 1室式	中 型 同 左	大 型 同 左	大 型 1室式	超大型 同 左
A 試験装置								
1. 三 軸 室			1室式	供試体上部より下方に載荷	供試体下部より上方に載荷		供試体上部より下方に載荷	・
2. 軸 載 荷 の 方 向			供試体下部より上方に載荷	供試体直径と同寸法の円形	同 左	同 左	供試体直径と同寸法の円形	・
3. 上下加圧盤の形状			供試体直径と同寸法の円形	回転可能	・	・	回転可能	・
4. 上部加圧盤の回転の有無			回転可能	分離型(平面)	・	・	分離型(球面)	・
5. 上部加圧盤とプッシュロッドまたは反力受け部との関係			分離型(球面)	有孔盤(φ5mm, 2cm千鳥)	ポーラスメタル	有孔盤	ポーラスメタル	・
6. 上下加圧盤の排水方法			10mm/枚×1枚(布入り)	0.6mm/枚×1~5枚	1.6 or 3.2mm/枚 3.2~8.0mm		1mm厚×2枚(D200) 2mm厚×2枚(D300)	3mm厚×1枚+ 5mm厚×1枚 or 3mm厚×3枚
7. ゴムスリーブ	0.5mm 3mm (φ100mm)φ150, 300mm)		油圧サーボ方法	MTS electrohydraulic system	同 左	同 左	電動油圧ポンプ式	同 左
8. 軸 載 荷 方 法			油圧を水圧に変換(ノルウェー型恒圧装置)	水 圧	空気圧	水 圧	空圧制御水圧置換式	・
9. 側圧の加圧方法	コンプレッサ 蓄圧 水槽式		供試体上部反力を三軸室の内部で測定		供試体上部反力を三軸室の内部で測定		三軸室の外部(供試体上部)で測定	・
10. 軸方向荷重の測定			軸載荷用油圧シリンダーの変位量を測定			三軸室内のキャップ部の変位測定, 軸載荷用ピストンの変位量を測定	軸載荷用油圧シリンダーの変位量を測定	・
11. 軸方向変位の測定			外体積変化量(三軸室内の水の出入量)ビューレット管方式	内体積変化量をビューレット方式で測定	同 左	内・外体積変化量を差圧計で測定	外体積変化量をペロフラム型で測定	・
12. 体積変化の測定	ビューレット水位計 光電管自動追尾方式		機械的に補正する				機械的に補正する	・
13. 載荷用ピストンの貫入量補正			マイクロコンピューター					・
14. 試験機制御			3分間に1回測定値をプリントアウトする	IBM-1620 パンチテープに集録	同 左	同 左	15秒間に1回測定値をプリントアウトする	同 左
15. 試験時の測定間隔	X-Yレコーダによる連続測定							

文 献 項 目	8) 岩 屋 ダ ム	9) 野田 (神戸大) 他	10) 酒見 (フジタ工業) 他	7) Marchi, Chan, Seed, Duncan			11) 12) 水野, 大蔵, 貞弘	
16. 測定項目および順序	同時測定 応力~ひずみ, 容積変化		①側圧 ②軸荷重 ③体積変化④軸変位	軸変位, 軸荷重, 体積変化	同 左	同 左	軸荷重, 側圧, 体積 変化, 軸変位	同 左
17. 供試体直径と高さとの比	250 mm/100 mm = 2.5 700 mm/300 mm = 2.3	200 mm/100 mm = 2.0	2400 mm/1200 mm = 2.0	178 mm/71 mm = 2.5	762/305 = 2.5	2288/914 = 2.5	400 mm/200 mm = 2.0 600 mm/300 mm = 2.0	1200 mm/600 mm = 2.0
18 端面摩擦の除去			.					
B 試験時の精度								
1. 軸 荷 重			3.4 ton				0.2 kgf/cm ²	0.3 kgf/cm ²
2. 側 圧			0	0.01 kgf/cm ² (14 kgf/cm ² 以下) 0.1 kgf/cm ² (70 kgf/cm ² 以下)			0.01 kgf/cm ²	同 左
3. 軸 変 位			0.005 mm				1/500	
4. 体 積 変 化			1.06 cm ³	0.72 cm ³			10 cm ³	
C 試験材料								
1. 母 岩 の 岩 種	凝灰流紋岩	道路用碎石	安山岩 qu=600~1000 kgf/cm ² (乾燥)	三種類の材料について各試験機で実施している ② 粘板岩 ① かんらん石玄武岩 ③ 角閃岩			流 紋 岩	
2. 粒子自体の強さ			qu=500~800 kgf/cm ² (飽和)				qu=1000~1500 kgf/cm ²	
3. 比重および吸水 量	Gg=2.654 Gb=2.613 Q=0.59%		Gb=2.23~2.26 Q=7~10%	Gs=2.62	2.87	2.94 (1/4以上) 2.86 (1/4以上)	Gb=2.544~2.579 Q=1.24~1.55%	
4. 粒 子 形 状			塊 状	very angular	angular	rounded	塊状, 板状	
5. 粒 度 分 布	相似粒度	相似粒度	相似粒度	相似粒度	同 左	同 左	相 似 粒 度	
6. 均 等 係 数	Uc=11	Uc=2.1	A粒度 Uc=20.1 B粒度 Uc=5.6	Uc=7	Uc=7	Uc=	Uc=9.5, 11.2	
7. 最大粒径(mm)	5, 15, 60	2, 4.76, 9.52, 19.1	60, 100, 200	11.9, 50.8, 152.4	同 左	同 左	31.7, 50.8, 101.6	
8. - 4.76mm (%)	100, 70, 25	100, 100, 60, 0	A 25, 12 B 9, 0				35, 24, 14	
9. D/dmax	20~5	50, 5.2	20~6					
10. 密 度	e ₀ =0.45, 0.55, 0.65 (Gg)	Dr=30, 60, 100%	A e ₀ =0.5 B e ₀ =0.65	e ₀ =0.457	e ₀ =0.430	e ₀ =0.216	e ₀ =0.351, 0.303 (e _b による)	
11. 含 水 状 態	W=1.2%						0.45~0.6%	

文 献	8)	9)	10)	7)	11) 12)
項 目	岩 屋 ダ ム	野田(神戸大)他	酒見(フジタ工業)他	Marachi, Chan, Seed, Duncan	水野, 大藪, 貞弘
D 供試体作成方法	ランマ突固め 振動バイブレータ		大型三軸用バイブ レータ	小 型 エアハンマー 5 層 供試体自立のため 真空ポンプで吸引	中 型 ロータリーバイブレー ター(重さ33.8kgf) 10層 同 左 大 型 同 左
E. 三軸圧縮試験方 法					
1. 供試体の状態		気乾燥状態	気乾状態($w=2\sim4\%$)	飽 和 状 態	自然含水比状態
2. 排 水 条 件	圧密排水試験		圧密排水試験	圧密排水試験	圧密排水試験
3. せん断方法	ひずみ制御法	軸方向変位制御		ひ ず み 制 御	ひ ず み 制 御
4. 試験側圧 (kgf/cm^2)	1, 2, 3, 5	0.5, 1.0, 1.5	2, 4, 6	2.11, 9.84, 29.5, 45.7	2, 4, 6, 8
5. 軸方向変位速度	1%/min	1 mm/min			1%/min
6. 圧 密 方 法					
7. 圧密完了基準					
F 試験結果	粒子の大きさは ϕ に あまり影響しない	最大粒径が大きくな ると ϕ も大きくなる	最大粒径が大きい方 が ϕ は小さい	最大粒径が大きくなると ϕ は減少する	最大粒径の増大にともない、 ϕ はやや低下 する。

表-1 最大粒径がせん断強度に及ぼす影響に関する既往の研究(その2)

項 目	文 献	石川, 大塚, 井口 ¹³⁾		Holtz, Gibbs ¹⁴⁾		
<u>A. 試験装置</u>						
1. 三 軸 室	一 室 式			一 室 式		
2. 軸 載 荷 の 方 向	供試体下部より上方に載荷			供試体下部より上方に載荷		
3. 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		
4. 上部加圧盤の回転の有無				回転可能		
5. 上部加圧盤とプッシュロッドまたは反力受け部との関係				分離型(球面) ピストン径 = 5.1 cm		
6. 上下加圧盤の排水方法				ポーラスメタル		
7. ゴムスリーブ				0.8 ~ 1.5 mm		
8. 軸 載 荷 方 法	電気油圧サーボ方式			圧縮試験機を利用		
9. 側圧の加圧方法				空気圧を水圧に変換		
10. 軸方向荷重の測定						
11. 軸方向変位の測定				軸載荷用ピストンの変位量を ダイヤルゲージで測定		
12. 体 積 変 化 の 測 定				外体積変化量(三軸室内の水の 出入量)		
13. 載荷用ピストンの貫入 量補正						
14. 試 験 機 制 御						
15. 試験時の測定間隔	ペン書きによる連続測定			レコーダによる連続測定 (軸荷重, 側圧)		
16. 測定項目および順序						
17. 供試体直径と高さとの比	600 mm / 300 mm = 2.0			572 mm / 229 mm = 2.5		
18. 端面摩擦の除去						
<u>B. 試験時の精度</u>						
1. 軸 荷 重						
2. 側 圧						
3. 軸 変 位						
4. 体 積 変 化						

項 目	文 献	13)	14)
C 試験材料	石川, 大塚, 井口	Holtz, Gibbs	
1. 母 岩 の 岩 種	流 紋 岩	河川堆積物 (片麻岩, 花崗岩, 片岩が卓越)	
2. 粒子自体の強さ	$q_u = 1000 \sim 2000 \text{ kgf/cm}^2$	$G_s = 2.52 \sim 2.63$	
3. 比重および吸水量	$G_b = 2.64$ $Q = 0.24 \sim 0.36 \%$	subangular to subrounded	
4. 粒 子 形 状	塊 状	せん頭粒度的	
5. 粒 度 分 布	せん頭粒度	6 ~ 12	
6. 均 等 係 数	13.6, 11.4, 7.6	19.1, 38.1, 76.2	
7. 最大粒径 (mm)	15, 30, 60	80, 50	
8. -4.76 mm (%)	45, 25, 10	12, 6, 3	
9. D/d_{max}	20, 10, 5	$D_r = 70 \%$ ($e_o = 0.404 \sim 0.418 \dots -4.76 \text{ mm } 80 \%$ $e_o = 0.293 \sim 0.317 \dots -4.76 \text{ mm } 50 \%$)	
10. 密 度	$e_o = 0.360 \sim 0.628$	湿った状態 (規定していない)	
11. 含 水 状 態			
D 供試体作成方法	バイブレーターランマー 5層		
E 三軸圧縮試験方法			
1. 供 試 体 の 状 態	飽和状態 (圧密後に飽和する)		
2. 排 水 条 件	圧密排水試験	圧密排水試験	
3. せん断方法	ひずみ制御	ひずみ制御	
4. 試験側圧 (kgf/cm^2)	1, 3, 5	0.36 % / min	
5. 軸方向変位速度	1 % / min		
6. 圧 密 方 法			
7. 圧密完了基準			
F 試験結果	粒子の大きさは ϕ にあまり影響しない	$d_{max} = 19.1 \sim 76.2 \text{ mm}$ で粒子の大きさは ϕ にあまり影響しない	

3. 最大粒径を変化させた相似粒度ロック材料の 三軸圧縮比較試験

3.1 試験目的

ロックフィルダムでは、材料の最大粒径が1 m以上に及ぶこともある。このような大きな粒子を含む材料をそのまま試験試料として用い、室内試験により強度を求めることは実質上不可能である。これに対処するため、一般に「相似粒度」、「剪頭粒度」という手法を用いて、実材料の粒度分布を供試体に許容される範囲の粒度分布に低減している。

当研究室では、昭和56年度に「相似粒度」の材料を用いて最大粒径の大小がせん断強度に与える影響について三軸圧縮比較試験を実施した。(以下 S.56試験という) S.56試験では、供試体直径が30, 50, 120 cmの三軸圧縮試験機を用いて、最大粒径は9.52, 19.1, 38.1, 63.5, 101.6, 250mmであった。

本試験は、S.56試験に引続き、最大粒径をさらに低減し、「相似粒度」の材料で最大粒径をどこまで低減できるかという、「相似粒度」の適用範囲を明らかにすることを目的としている。

S.56試験の要約を以下に述べる。

三軸圧縮試験機は、供試体直径の異なる次の三種類の試験装置を使用した。

①径30 cm, 高さ60 cm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所有。以下D30-S.56供試体, D30-S.56試験とは、それぞれ昭和56年度のこの試験機による供試体, 試験を指す。

②径50 cm, 高さ100 cmの三軸圧縮試験機(D50)

日本技研株式会社技術研究所所有。以下D50供試体, D50試験とは、それぞれ昭和56年度のこの試験機による供試体, 試験を指す。

③径120 cm, 高さ240 cmの三軸圧縮試験機(D120)

フジタ工業株式会社技術研究所所有。以下D120供試体, D120試験とは、それぞれ昭和56年度のこの試験機による供試体, 試験を指す。

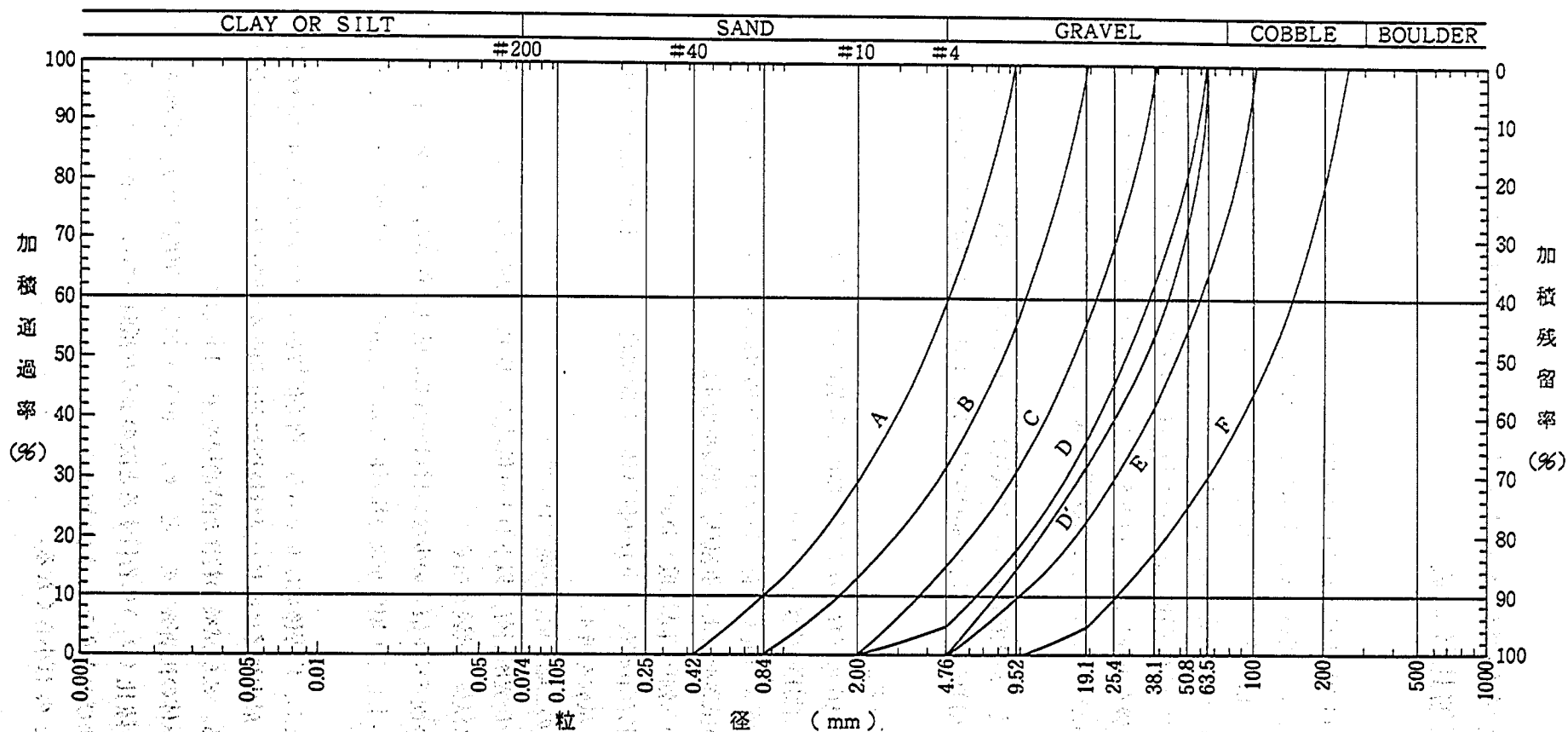
試験に使用した材料は、堅硬で粒子破砕の少ない材料である。供試体作成時(締固め時)および三軸圧縮試験中に粒子破砕が生じると現象がより複雑になることから、このように堅硬な材料を選定して使用している。

試験粒度分布は相似粒度とし、均等係数は6である。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。S.56試験の粒径加積曲線を図-1に示す。

S.56試験においては、供試体の初期密度を一定($e_0 = 0.45$)にして実施したが、圧密終了後あるいはせん断開始直前の間隙比(e_c)に着目すると次のような傾向がある。(図-2, 図-3)

①D30に比較してD50およびD120の e_c が大きい。

②最大粒径が大きくなると e_c は小さくなる。



粒度	A	B	C	D	D'	E	F	粒度	A	B	C	D	D'	E	F
最大粒径 mm	9.52	19.1	38.1	63.5	101.6	250		D ₈₅ 粒径 mm	8	17	34	52	57	88	210
最小粒径 mm	0.42	0.84	2.0	2.0	4.76	4.76	9.52	均等係数 U _c	6	6	6	6	6	6	6
D ₁₀ 粒径 mm	0.84	1.8	3.7	6.4	7.7	9.5	25.4	曲率係数 U _c	1.0	1.1	1.1	1.2	1.0	1.1	1.0
D ₁₅ 粒径 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 ₆₀ 粒径 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 ₉₀ 粒径 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

図-1 S.56試験の試験粒径加積曲線

③側圧が大きくなると e_c は小さくなる。

④圧密後の平均間隙比とせん断抵抗角との間には強い相関があり、この相関は一般に言われている密度が大きい方が小さいものよりせん断抵抗角が大きくなるという事に一致している。

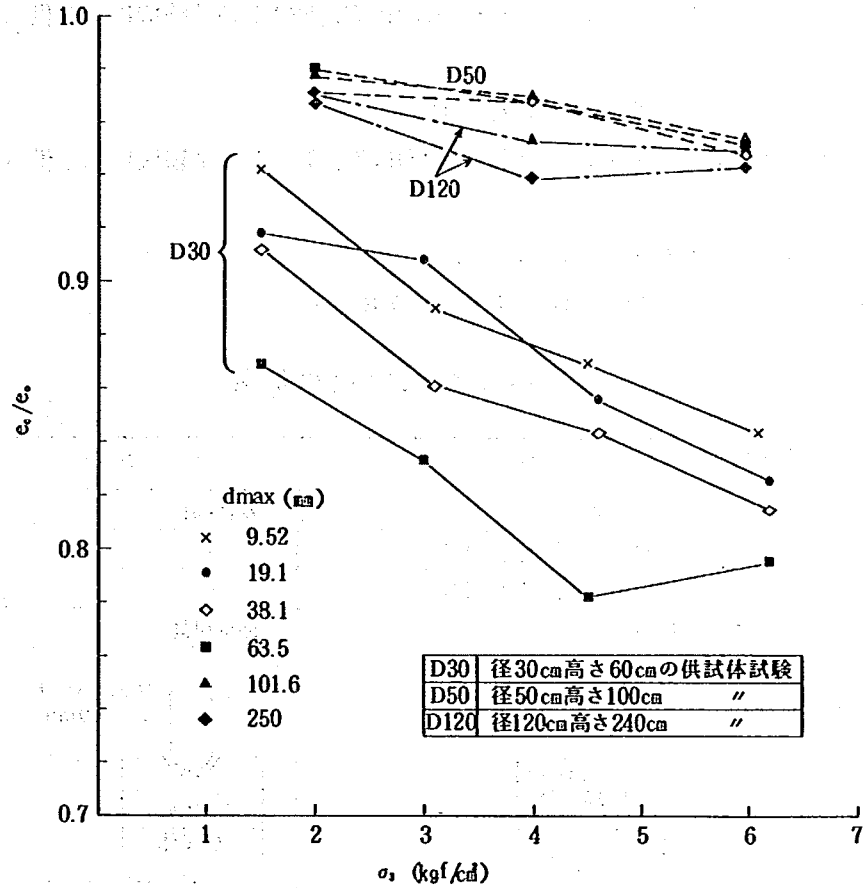


図-2 S.56試験の σ_3 と e_c/e_o の関係

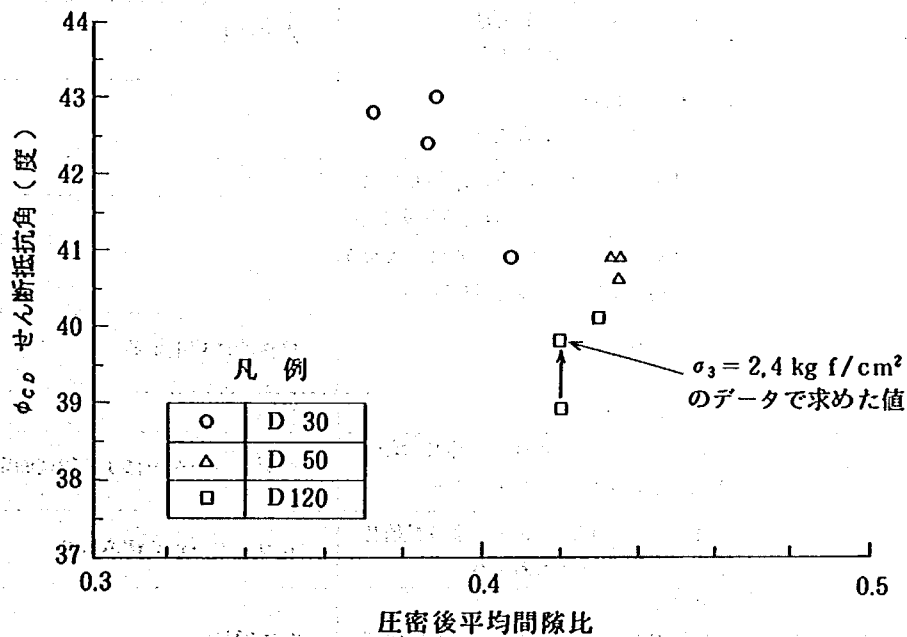


図-3 S.56試験の圧密後間隙比とせん断抵抗角

3.2 試験方法

3.2.1 三軸圧縮試験機

本比較試験では、当研究室所有の供試体直径（D）の異なる次の2種類の試験装置を使用した。

①径10 cm、高さ20 cmの三軸圧縮試験機（D10）

以下D10供試体、D10試験とは、それぞれ昭和57年度のこの試験機による供試体、試験を指す。

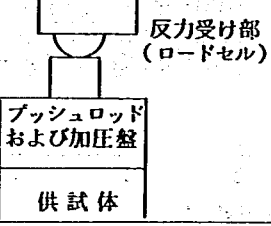
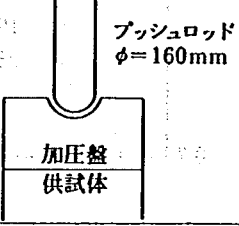
②径30 cm、高さ60 cmの三軸圧縮試験機（D30）

以下D30供試体、D30試験とは、それぞれ昭和57年度のこの試験機による供試体、試験を指す。

各三軸圧縮試験機の概要を表-2に示す。

試験装置の概略図と配管系統図を図-4～図-7に示す。

表-2 三軸圧縮試験機の概要

項目	D 10	D 30
三軸容器	1室式	左に同じ
軸荷荷の方向	供試体下部より上方に荷重	〃
上下加圧盤の形状	供試体直径と同寸法の円形	〃
上加圧盤の回転の有無	固定	回転可能
上加圧盤とプッシュロッドまたは反力受け部との関係	 反力受け部（ロードセル） プッシュロッドおよび加圧盤 供試体	 プッシュロッド φ=160mm 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
ゴムスリーブ	外側 0.5 mm、内側 1.8 mm	1.5 mm / 枚 × 2 枚
軸荷荷方法	油圧シリンダーによる方法（電気-油圧サーボ方式）	左に同じ
側圧の加圧方法	油圧を水圧に変換（電気-油圧サーボ方式）	〃
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	〃
軸方向変位の測定	軸荷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）を加圧用シリンダーの変位量で測定	〃
荷重用ピストンの貫入量補正（見掛けの体積）	計算により補正する	機械的に補正する
試験機制御	マイクロコンピューター	設定器
試験時の測定間隔	ペンレコーダーによる連続測定12秒間に1回測定値をプリントアウトする。	ペンレコーダーによる連続測定
測定値	マイクロコンピューターにより数値化し、プリンターで出力する。	レコーダーから読み取る
測定項目および測定順序	同時測定 軸荷重（応力）、軸変位、側圧体積変化	左に同じ

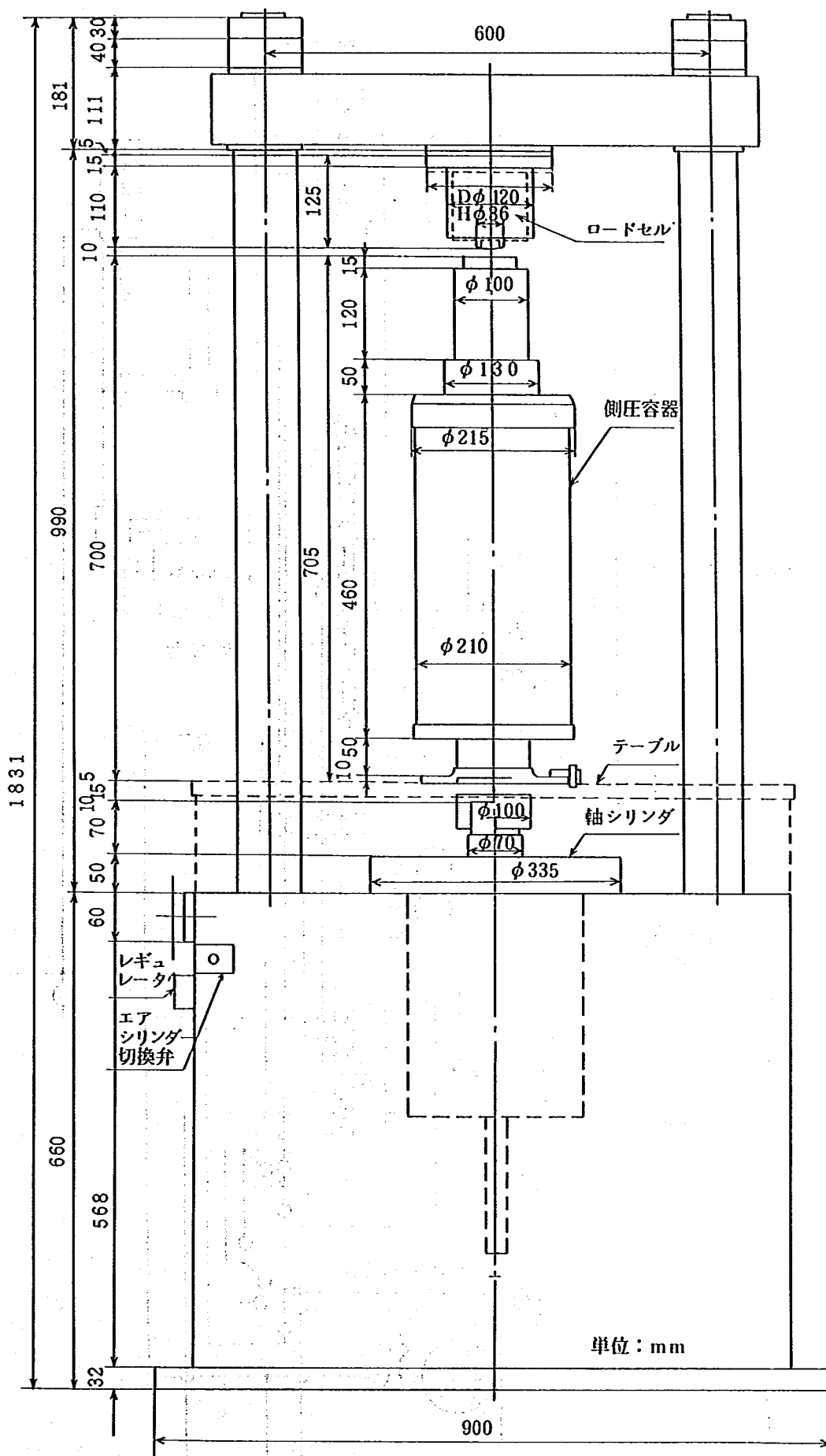


図-4 D10の三軸圧縮試験機

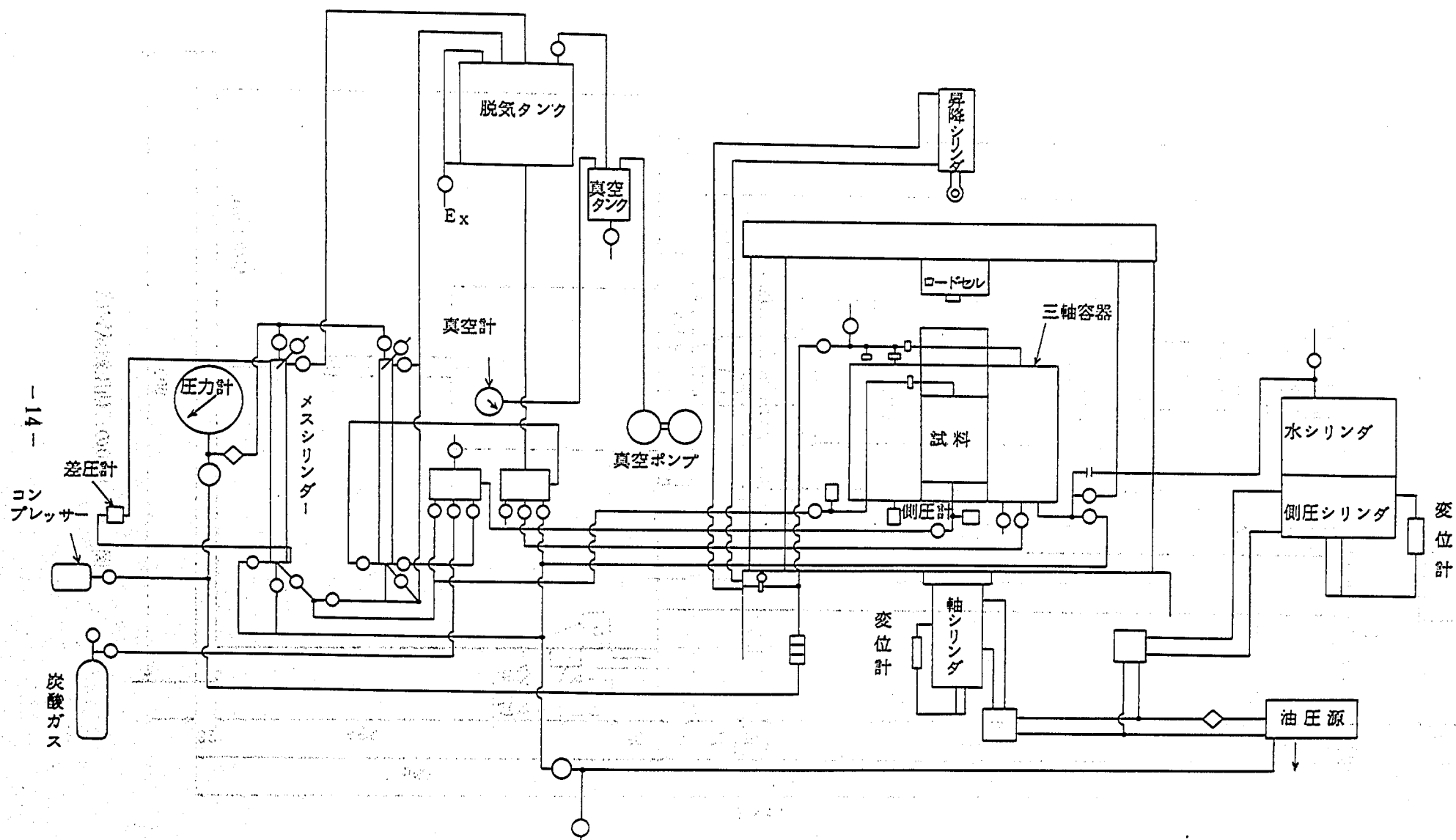


図-5 D10の配管系統図

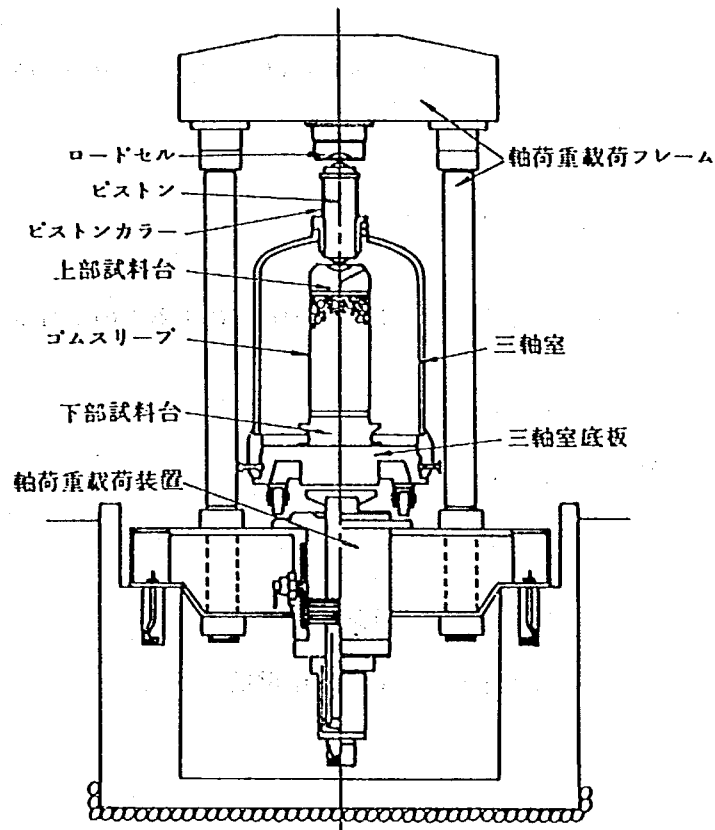


図-6 D30の三軸圧縮試験機

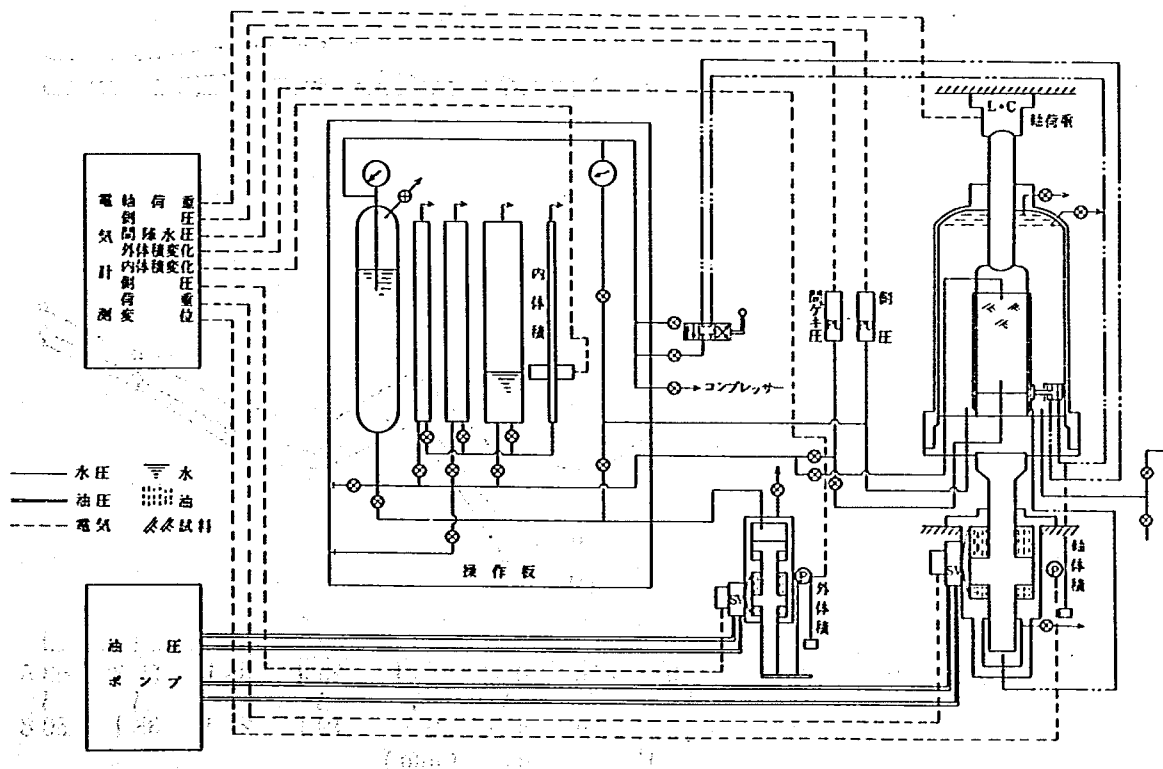


図-7 D30の配管系統図

3.2.2 試験材料

本比較試験に使用した材料は、S56試験と同一のものであり、堅硬で粒子破碎の少ない材料である。試験材料の性質を以下に述べる。

1) 比重、吸水率および含水比

表-3に示す試験方法により実施した。

図-8に試験結果を示す。

なお、図中における比重および吸水率は以下の定義によるものである。

$$\text{表乾比重 } G_a = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{絶乾比重 } G_b = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{真比重 } G_g = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{吸水率 } Q = \frac{B - A}{A} \times 100(\%)$$

A: 絶乾重量 B: 表乾重量 C: 水中重量

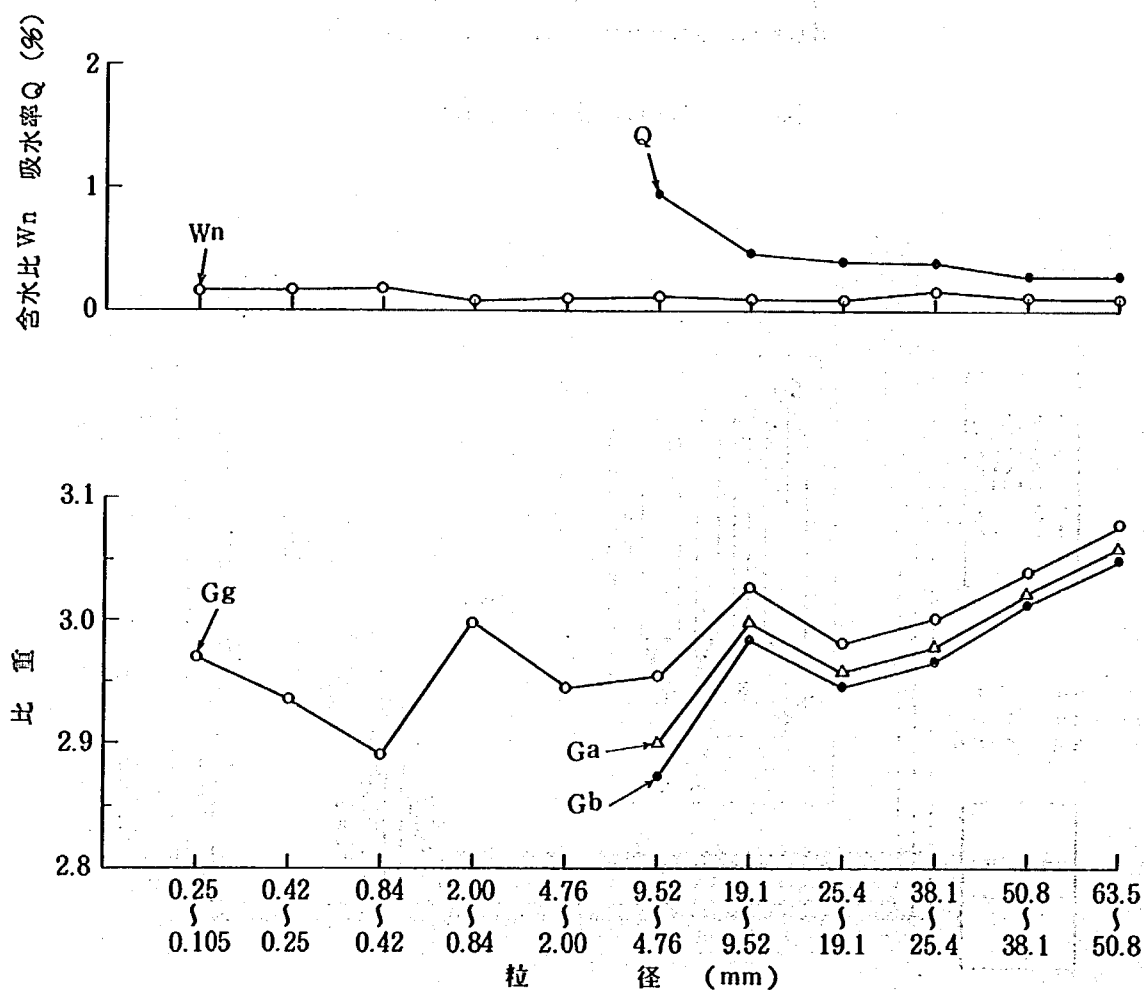


図-8 粒径と物性値

表-3 試験方法

試 験	規 格	対 象 粒 径
含 水 量 試 験	J I S A 1203-1978	全 粒 径
粗粒材の比重及び吸水量試験	J I S A 1110-51	4.76 mm 以上
土 粒 子 の 比 重 試 験	J I S A 1202-1978	4.76 mm 以下

2) 粒子形状

粒子形状の表現法については、形状係数 (shape factor) , スヘリシティ (sphericity) , ラウンドネス (roundness) , アンギュラリティ (angularity) などいくつかの提案がなされているが、ここでは Zingg の分類法を行った。¹⁹⁾

Zingg の分類法を以下に示す手順で実施した。

- ① 試料は 63.5 ~ 2.00 mm の粒径範囲の中を 7 種類に分級した粒径の各々から無作為に 63.5 ~ 25.4 mm については 30 個, 25.4 ~ 2.00 mm については 100 個抽出した。
- ② 粒子の最大長 (a) , 中間長 (b) , 最小長 (c) をノギス (最小目盛 1 / 10 mm) により測定した。
- ③ ②の測定結果を使って、偏平率 (p) , 細長率 (q) を 1 個ずつ次式に従って計算した。

$$p = \frac{c}{b} , \quad q = \frac{b}{a}$$

- ④ ③で求めた p , q 値を p - q 平面上にプロットし、Zingg の分類を行い形状を判別した。結果を表-4 および付図-1 に示す。

粒径の大きい粒子は塊状が多いが、25.4mm 以下については板状および塊状が多く、葉状がやや少ないほぼ同一の粒子形状を有する材料であると思われる。

なお、粒子に黒く着色して撮影したものを付図-2 に示す。

表-4 粒 子 形 状

形状	63.5 50.8 50.8	50.8 38.1 38.1	38.1 25.4 25.4	25.4 19.1 19.1	19.1 9.52 9.52	9.52 4.76 4.76	4.76 2.00 2.00	全 体
板 状	7 %	27 %	33 %	47 %	35 %	40 %	40 %	33 %
葉 状	0	6	7	10	7	10	14	8
塊 状	86	50	50	26	36	36	26	44
棒 状	7	17	10	17	22	14	20	15
判 別	塊 状	塊 状 板 状	塊 状 板 状	板 状 塊 状	塊 状 板 状	板 状 塊 状	板 状 塊 状	塊 状 板 状
試験個数	30	30	30	100	100	100	100	490

3) 粒子自体の強さ

粒子自体の強さを表わす指標としては、次のものが考えられる。

- ㊤ 粒子の一軸圧縮強度
- ㊦ 粒子の引張強度
- ㊧ 粒子のせん断強度
- ㊨ 粒子の弾性波速度
- ㊩ 粒子の絶乾比重
- ㊪ 粒子の吸水率

粒子の強さに関しては、粒子の寸法による影響が考えられるため、粒度階ごとの測定値が必要である。したがって、できるだけ小粒径の粒子についても試験が可能でなければならない。ここでは、非整形粒子の引張強度を評価するための簡易試験方法である点载荷圧裂試験を実施した。

試験は、非整形の岩石に点载荷を与えて、破壊時の極限荷重（ F_0 ）から引張強度（ St ）を求めるものである。 St の値は近似的に次式で与えられている。¹⁶⁾

$$St \doteq 0.891 \frac{F_0}{d^2}$$

d ：载荷点間隔

試験は、9.52～63.5mmの粒径範囲の中を5種類に分級した粒径の各々から無作為に10個抽出して行った。なお、試験粒子は自然乾燥状態（ $W_n \doteq 0.1\%$ ）のものである。

点载荷圧裂試験の結果を図-9に示す。なお、同図には他のロック材料の試験結果も合わせて示す。

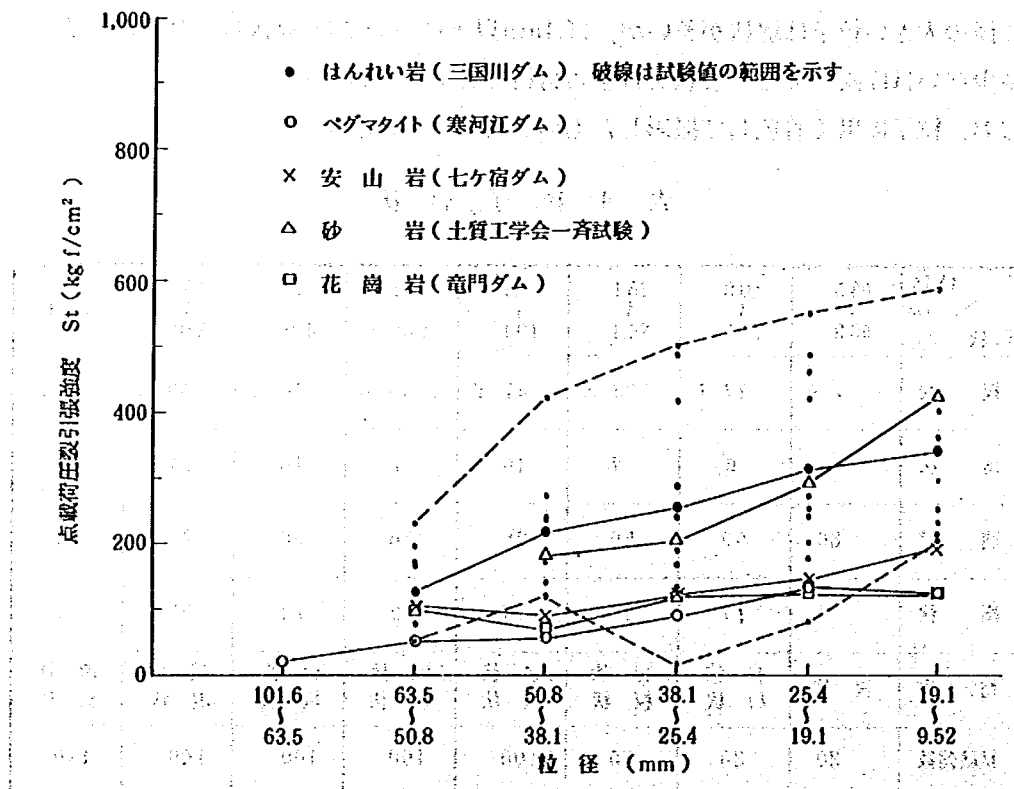


図-9 粒径別点载荷圧裂強度

測定値にバラツキがあり、またデータ数は少ないが、各粒径とも比較的大きな引張強度を有する堅硬な材料であることが判る。また、粒径が小さい方が点載荷圧裂強度が大きい傾向を示している。しかし、この試験方法は、同じ粒径を有する粒子の強さを比較する場合はよいが、粒径の異なる粒子間の強さを比較することには、 S_I を求める式の分母が d^2 となっていること、また、粒径が小さくなると点載荷とは言い難くなること等若干検討を加える必要があるものと思われる。

3.2.3 試験ケース

1) 粒度分布

試験粒度分布は、表-5に示すようにS.56試験と同一の均等係数条件を満たす相似粒度分布とし、最大粒径を低減させている。

表-5に対応した粒径加積曲線を図-10に示す。

表-5 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}	2.00, 4.76, 9.52, 19.1, 25.4, 38.1, 63.5 mm

2) 供試体密度

供試体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を合わせる方法または、単に密度を合わせる方法の二通りがある。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おらず、特に最小間隙比 (e_{min}) の測定法には締固め方法および粒子破碎性とも関連して、難しい点が多いため同一密度で実施することとした。その際の密度とは、以下の定義による間隙比とした。

$$\text{間隙比 } (e) = \frac{\rho_w \cdot \bar{G}_b}{\rho_d} - 1$$

ρ_w : 水の密度

$\bar{G}_b$: 材料の合成絶対乾比重

ρ_d : 供試体の乾燥密度

ここで、合成絶対乾比重 $\bar{G}_b$ とは次式による。

$$\bar{G}_b = \frac{1}{\sum \frac{f_i}{G_{bi}}}$$

f_i : 各粒度階における残留率

G_{bi} : 各粒度階における絶乾比重

S.56試験においては、供試体の初期密度を一定 ($e_o = 0.45$) にして実施したが、3.1のS.56試験の要約で述べたことから、本比較試験では圧密後の間隙比にも着目し、供試体の密度を次の2通りの方法で規定して試験を実施した。

(e_o 一定試験)

通常行われている三軸圧縮試験と同様に、供試体の初期密度 (e_o) を一定にして三軸圧縮試験を行う方法である。

D10の e_o は、S.56試験の値 ($e_o = 0.45$) に一致させたかったが、後述の締固め試験結果より $e_o = 0.56$ とした。

(e_c 一定試験)

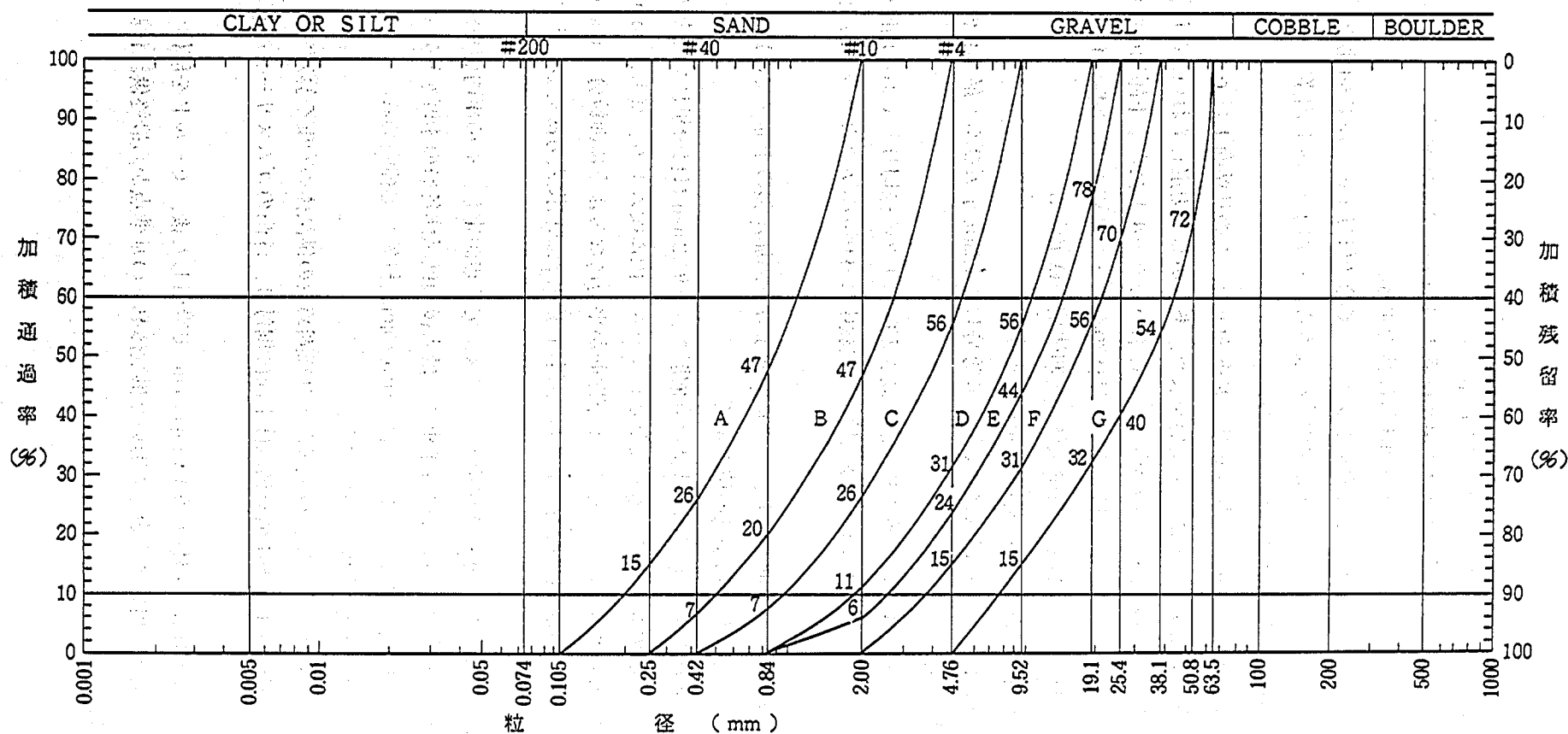
各側圧に応じ、供試体の初期密度 (e_o) を変化させて圧密し、供試体の圧密後の密度 (e_c) を一定にした後に軸圧縮過程 (せん断) に移行する方法である。

D10試験では、 e_o 一定試験結果より $e_c = 0.53$ とした。D30試験では、S.56試験との関連で $e_c = 0.435$ とした。

試験ケースを表-6に示す。

表-6 試験ケース一覧表

最大粒径 d_{max} (mm)		2.00	4.76	9.52	19.1	25.4	38.1	63.5
粒 度 曲 線		A	B	C	D	E	F	G
D 10 (D10×H20 cm)	D/ d_{max}	50	21	10.5	5.2	3.9	—	—
	e_o 一定 ($e_o = 0.56$)	○	○	○	○	○	—	—
	e_c 一定 ($e_c = 0.53$)	○	○	○	○	○	—	—
D 30 (D30×H60 cm)	D/ d_{max}	—	—	31.5	15.7	—	7.9	4.7
	e_o 一定	—	—	—	—	—	—	—
	e_c 一定 ($e_c = 0.435$)	—	—	○	○	—	○	○



粒度	A	B	C	D	E	F	G	粒度	A	B	C	D	E	F	G
最大粒径 mm	2.00	4.76	9.52	19.1	25.4	38.1	63.5	D_{85} 粒径 mm	1.7	3.1	8.0	18	21	31	57
最小粒径 mm	0.105	0.25	0.42	0.84	0.84	2.00	4.76	均等系数 U_c	6	6	6	6	6	6	6
D_{10} 粒径 mm	0.20	0.48	0.95	1.9	2.5	3.8	7.7	曲率系数 U_c	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0
D_{15} 粒径 mm	0.25	0.65	1.3	2.4	3.2	5.0	9.5	比 重							
D_{50} 粒径 mm	0.88	2.1	4.2	8.5	12	17	37	吸 水 量 (%)							
D_{60} 粒径 mm	1.2	2.8	5.3	11	15	21	44								

图-10 试验粒径加积曲线

3.2.4 供試体の作成方法

(D10供試体)

供試体は6層に分けて締固める。作成の手順を以下に示す。

- ① 内側および外側のゴムスリーブ厚をノギス(最小目盛 $1/10\text{ mm}$)で測定する。
- ② 外側のゴムスリーブ($t \approx 0.5\text{ mm}$)を下部加圧盤に装着する。
- ③ 三ッ割モールドを組立て、固定バンド2本をドライバーで締め付けてモールドを固定する。
- ④ モールド内径をノギスで3点測定し、その平均値を求める。(平均モールド内径) - (ゴムスリーブ厚合計)を供試体初期直径(D_0)とする。
- ⑤ 三軸室内にある3本の支柱の上面に鉄板をのせて基準面とし、この基準面よりモールド上面までをノギスにて6点測定する。6点の平均値を求め、あらかじめ測定しておいた基準面と下部加圧盤の上面までの距離からこの平均値を差し引いてモールド高さ(下部加圧盤の上面からモールド上面までの高さで、目標とする供試体の高さ)を求める。(図-11)
- ⑥ ④および⑤の測定結果より、目標とする供試体の初期体積を算定する。
- ⑦ 設定した初期密度に対する投入試料の湿潤重量を算定する。
- ⑧ 試料は試験粒度分布に従い、各粒径毎に必要な量を6等分して上皿電子天びん(最小目盛 $1/100\text{ g}$)にて計量する。
- ⑨ 外側のゴムスリーブをモールドに密着させた後、高さ方向に1ヶ所縁切りしてある内側のゴムスリーブ($t \approx 1.8\text{ mm}$)を締固めおよび三軸圧縮試験中に外側のゴムスリーブを防護する目的で装着した。
- ⑩ モールド上面に鉄板をのせて基準面とし、この基準面より下部加圧盤の上面までの距離をノギスにて7点測定し、その平均値を基準値とする。
- ⑪ ⑧で準備した試料を各層とも -9.52 mm は試料分取器で、 $+9.52\text{ mm}$ は目分量にて2等分し、 $+9.52\text{ mm}$ 、 -9.52 mm の順に布にくるんで静かにモールド内に投入する。なお、 $d_{\max} = 9.52, 19.1, 25.4\text{ mm}$ の供試体については、上下端面が平滑になるように細粒分(D_{30} 粒径程度以下約 150 gf)にて端面処理を行う。各最大粒径に応じた試料投入方法を表-7に示す。
- ⑫ ⑩で述べた基準面より各層の上面までの距離をノギスにて7点測定し、その平均値を求める。基準値よりこの平均値を差し引いて厚さを求め、投入後の供試体各層の密度を算定する。
- ⑬ 図-12に示すように、締固め用突棒を木づちにて所定の回数打撃して締固める。
- ⑭ ⑬と同様に、締固め後の各層の密度を算定する。
- ⑮ 最終層については⑤と同様の方法で、投入後および締固め後の供試体の密度を算定する。
- ⑯ ロッドと一体になっている上部加圧盤を供試体上面に据付け、外側のゴムスリーブを装着する。
- ⑰ 供試体を真空ポンプにより $10\text{ cmHg} \approx 0.13\text{ kgf/cm}^2$ で吸引した後、モールドを解体する。
- ⑱ あらかじめダミー供試体を用いて測定しておいた供試体高さの基準点から最終供試体高さを求める。(図-13)

表-7 試料投入方法 (D10)

dmax (mm)	2.00, 4.76	9.52	19.1, 25.4
第1層	1層分を2回に分けて布にくるんで投入し、ヘラで敷均し後締固める。	-2.00mm 半分投入し、ヘラ及び締固め用突棒にてならした後 +2.00mm 半分投入する。9.52 ~ 0.42mm まで残り半分すべて投入しヘラで敷均し後締固める。	-4.76mm 半分投入し、ヘラ及び締固め用突棒にてならした後 +9.52mm, 9.52 ~ 4.76mm の順でそれぞれ半分投入する。 +9.52mm 残り半分投入し、敷均し後 -9.52mm 残り半分投入し、締固める。
第2層 ~第5層	同上	1層分を2回に分けて投入し、ヘラで敷均し後後締固める。	+9.52mm 半分投入し、敷均し後 -9.52mm 半分投入する。残り半分以上を同様に投入後締固める。
第6層	1層の半分以上を投入後、所要の密度に締固める。残り半分以上を少量ずつ2 ~ 3回に分けて投入締固めをくり返し、所要の密度にする。	1層の半分以上を投入後、所要の密度に締固める。+2.00mm 残り半分以上を投入し、-2.00mm の残り半分以上を少量ずつ2 ~ 3回に分けて投入、締固めをくり返し所要の密度にする。	+9.52mm 半分投入、敷均し後 -9.52mm 半分投入、敷均し後所要の密度に締固める。+9.52mm, 9.52 ~ 4.76mm 残り半分以上を少量ずつ2 ~ 3回に分けて投入し、締固めをくり返して所要の密度にする。

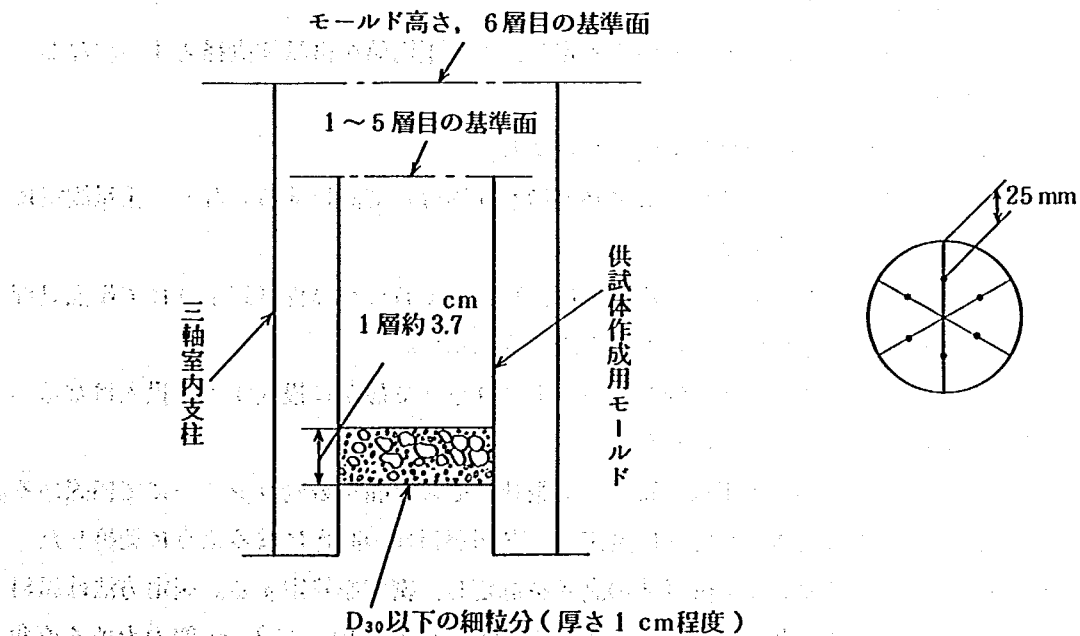


図-11 高さ測定位置



図-12 締固め方法

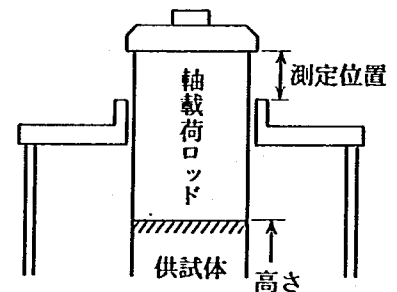


図-13 最終供試体高さの測定方法

(D30供試体)

供試体は6層に分けて、図-14に示す振動ランマーを用いて締固める。振動ランマーの仕様を表-8に示す。次に作成の手順を示す。

- ① 下部試料台座にゴムスリーブ($t \approx 1.5 \text{ mm}$) 2枚およびモールド($D = 30.4 \text{ cm}$, $H = 60 \text{ cm}$)をセットする。また、ゴムスリーブを保護するためにスチール板($t = 1.2 \text{ mm}$)をゴムスリーブの内側に装着する。
- ② 内径を5方向(正10角形の対角線方向)測定し、その平均値を供試体直径とする。なお、供試体高さは62 cmに設定する。
- ③ 設定初期密度に対する試料の湿潤重量を算定する。
- ④ 試料は試験粒度分布に従い、各粒径毎に必要な量を6等分して計量する。なお、重量測定には1 g単位目盛の天びんを使用する。
- ⑤ 供試体の上下端面が均等な平面になるように、細粒分(D_{30} 粒径程度以下)にて端面処理を行う。各最大粒径に応じた端面処理方法を表-9に示す。
- ⑥ ④で準備した試料を各層とも16等分し、ハンスコップで静かに投入する。投入はなるべく試料を平均的に分散させるようにした。
- ⑦ 試料の表面に厚さ0.8 cmの円平板(鉄板)を載せ、その上面を振動ランマーにて締固める。締固め時間は、供試体の高さを62 cmに設定し、各層が目標の高さになるように調整した。
- ⑧ 各層の投入後および締固め後に供試体の高さを測定し、密度を算定する。測定方法は試料の表面に厚さ0.8 cmの円平板を載せ、モールド外周から中心に向かって2 cm離れた所を直角方向に4点、中心を1点の計5点測定する。測定値の平均値より供試体高さを求める。
- ⑨ ゴムスリーブ保護用のスチール板を引抜く。

- ⑩ 供試体上面に上部加圧盤を載せ、ゴムスリーブを装着する。
- ⑪ 供試体を真空ポンプにより 10 cmHg $\approx$ 0.13 kgf/cm² で吸引した後、モールドを解体する。

表-8 ランマー仕様

全負荷打撃数	950 打撃 / 分
本体重量	33 kgf
加圧盤直径	20 cm

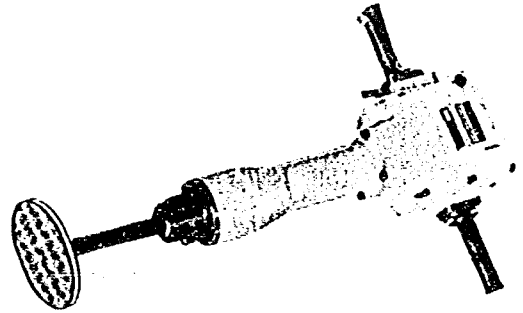


図-14 振動ランマー外観

表-9 D30の供試体端面処理方法

試験ケース	粒 径 (mm)	下 端 面 処 理			上 端 面 処 理		
		粒径(mm)	厚さ(mm)	投入量(gf)	粒径(mm)	厚さ(mm)	投入量(gf)
D30- ϕ c一定 dmax = 9.52 mm	9.52 ~ 0.42	2.00 ~ 0.42	2.0	300	—	—	投入なし
dmax = 19.1 mm	19.1 ~ 0.84	4.76 ~ 0.84	3.0	300	4.76 ~ 0.84	—	100
dmax = 38.1 mm	38.1 ~ 2.00	9.52 ~ 2.00	5.0	500	9.52 ~ 2.00	—	300
dmax = 63.5 mm	63.5 ~ 2.00	9.52 ~ 2.00	6.5	650	9.52 ~ 2.00	—	500

3.2.5 三軸圧縮試験方法

試験条件および方法を表-10に示す。

表-10 試験条件および方法

項目 \ 供試体	D 10	D 30
供試体の状態	不飽和状態 (W < 1%)	
排水条件	圧密排水試験 (CD)	
せん断方法	側圧一定軸方向変位制御法	
試験側圧	2, 4, 6 kgf/cm ²	
軸方向変位速度	1 mm/min (= 0.5%/min)	3.3 mm/min (= 0.5%/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	
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	

3.3 試験結果

3.3.1 三軸圧縮試験機の精度検定試験

D30試験機は常用されており、精度は検定されているため、D10試験機についてのみ各検出器の精度を検定した。

1) 側圧

a) 検定方法

図-15に示すような分銅荷重を油圧に変換して載荷する基準重錘型圧力計（圧力検定器）を用いて側圧計の検定を行った。

10 kgf/cm² までを 0.5 kgf/cm² 間隔で載荷し、側圧計の読み取りは CRT ディスプレイに表示されるモニターの側圧値（SDP）にて行った。

b) 検定結果

圧力検定器の載荷値と側圧の誤差との関係を図-16に示す。これより、今回実施した試験の側圧範囲（0～6.5 kgf/cm²）における側圧計の誤差は±0.02 kgf/cm² となる。なお、側圧の校正式を下に示す。

$$T = 0.9921 M + 0.013$$

T : 較正值, M : 測定値

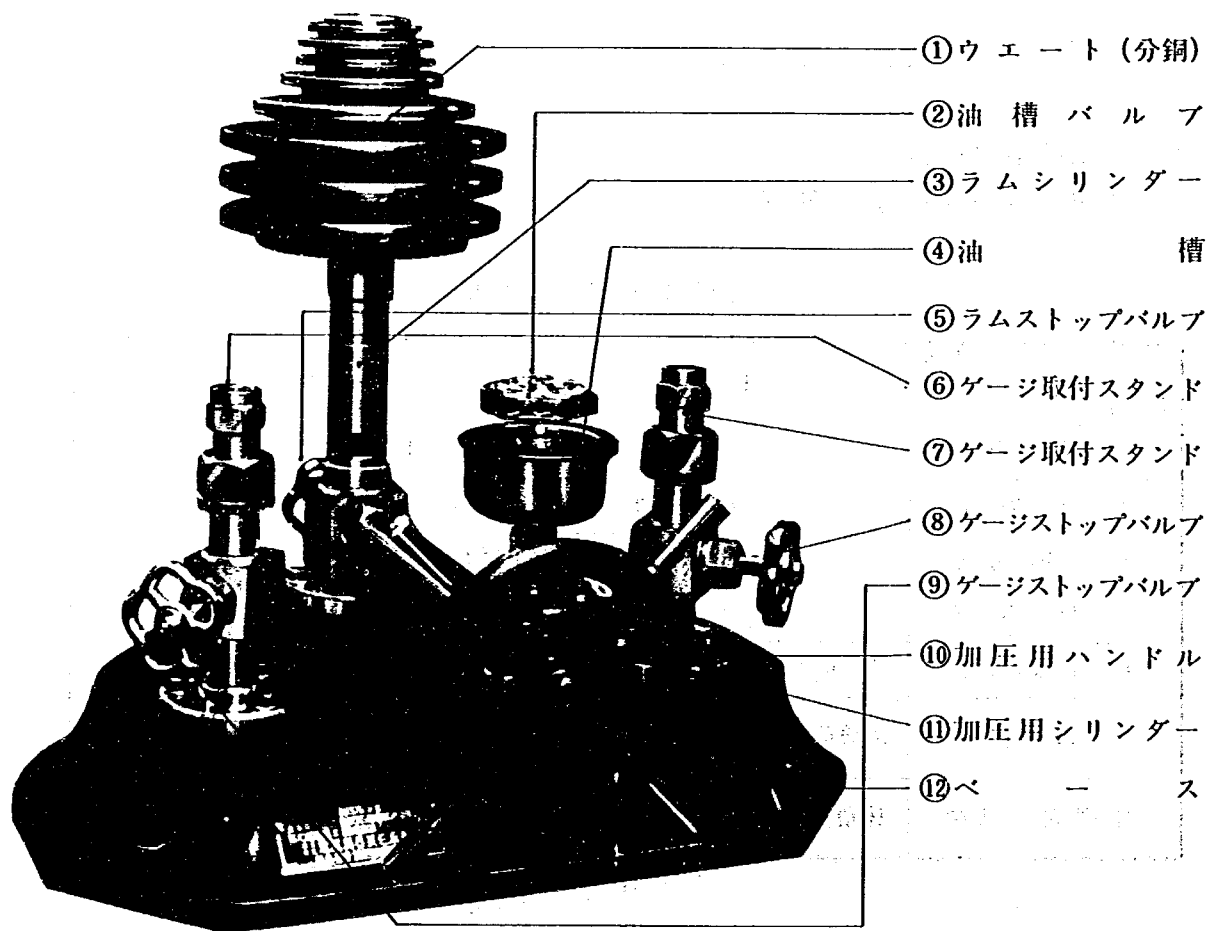


図-15 圧力検定器

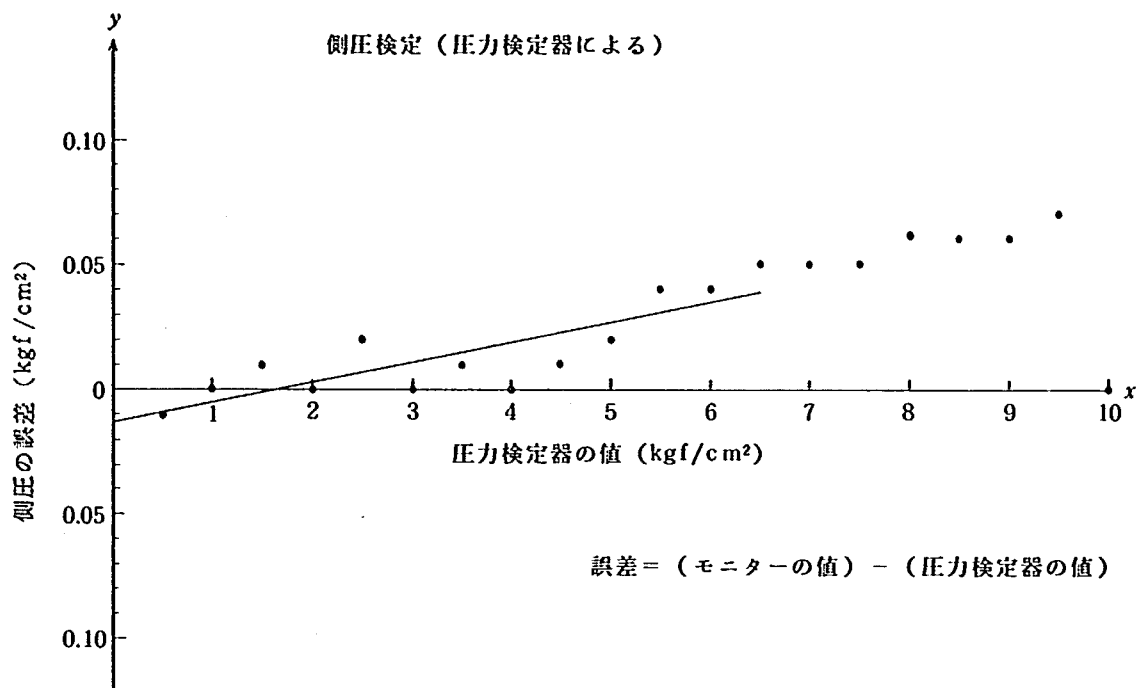


図-16 側圧検定結果

2) 軸荷重

a) 検定方法

当研究室所有の改良型一面せん断試験機の垂直応力载荷装置部（レバー比 1 : 20）を用いて、死荷重によりロードセルの検定を行った。重すいを段階的に载荷および除荷し、ロードセルの読み取りは、側圧と同様にモニターの軸荷重値（AXL）にて行った。

また、载荷ロッド部の摩擦は側圧を一定値に保ち、その側圧によりロッドを浮かせた状態で三軸室を上下させて測定した。

b) 検定結果

载荷荷重とロードセルの誤差との関係を図-17に示す。これより、今回実施した試験の軸荷重範囲（0～3 tf）におけるロードセルの誤差は±12 kgfであり、またモニター値の表示が10 kgf単位で10 kgf以下は四捨五入されることを考えあわせると、ロードセルの誤差は±15 kgfとなる。

側圧と载荷ロッドの摩擦力との関係を図-18に示すが、これより側圧 2～6 kgf/cm² の時の摩擦力は10～12 kgfである。

3) 軸変位

a) 検定方法

軸変位計の検定は、精度 1/100mm のダイヤルゲージを用いて行った。軸変位計の読み取りは、側圧と同様にモニターの軸変位値（AXD）にて行った。

b) 検定結果

ダイヤルゲージの値と軸変位計の誤差との関係を図-19に示す。今回実施した試験の軸変位範囲（0～40 mm）における軸変位計の誤差は±0.06 mmとなる。なお、軸変位の較正式

を下に示す。

$$T = 0.9923 M + 0.003 \quad (\text{mm})$$

T : 校正值, M : 測定値

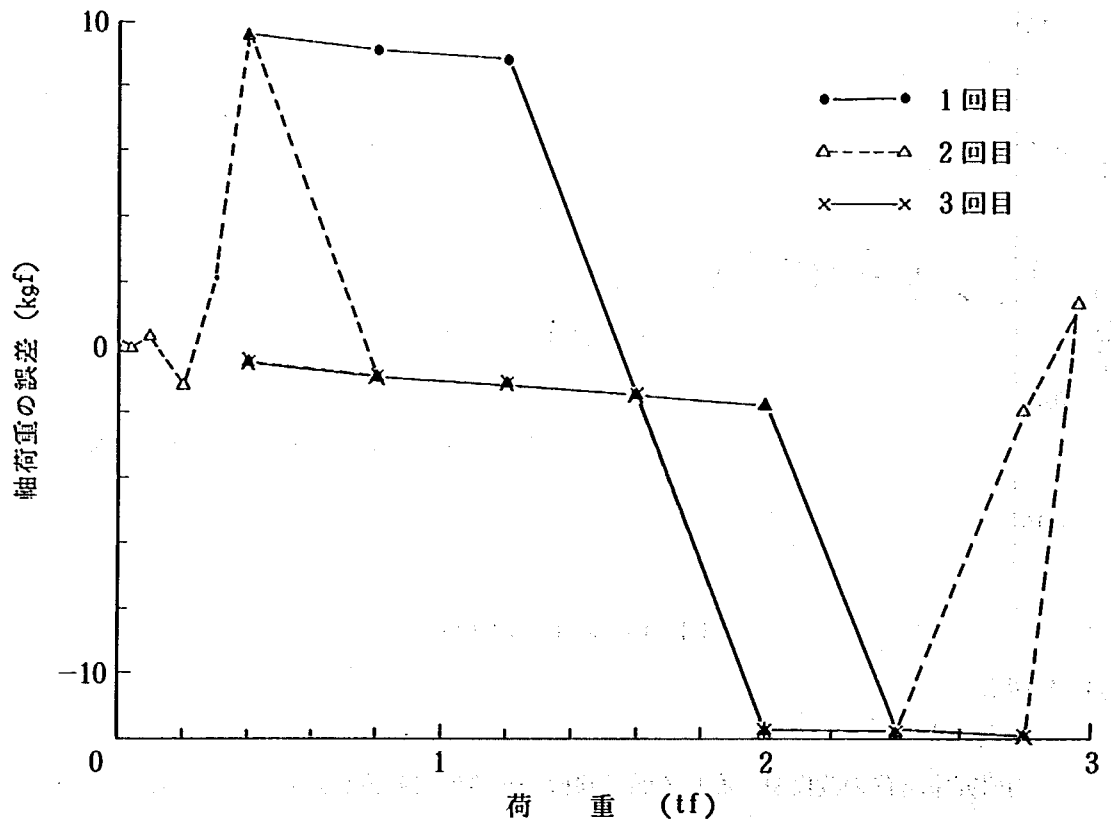


図-17 ロードセル検定結果

断面積 = 78.5 cm²

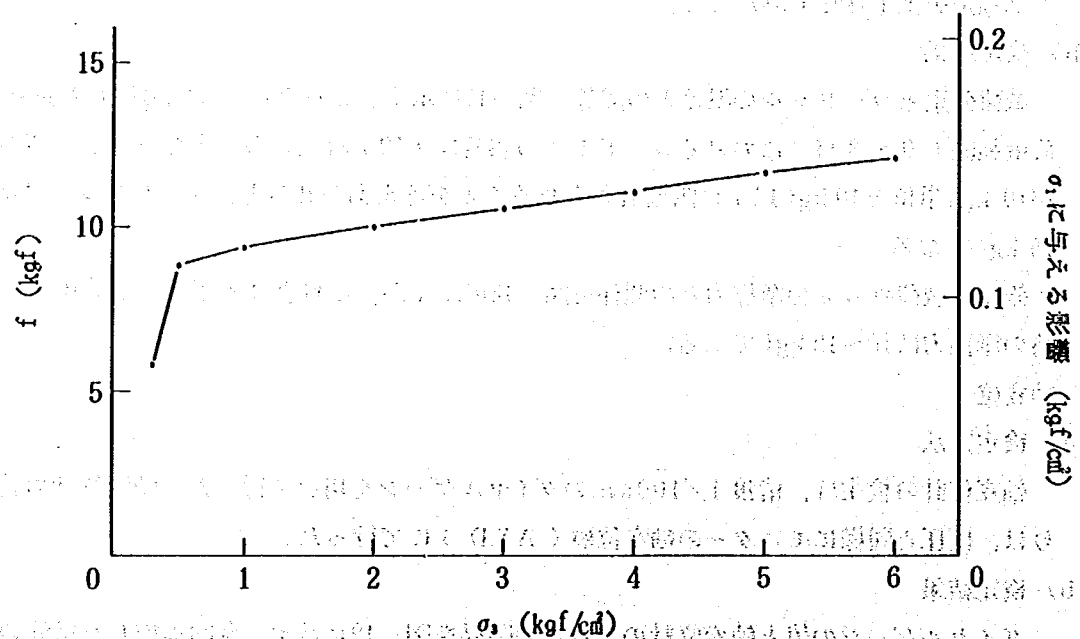


図-18 载荷ロッド部の摩擦

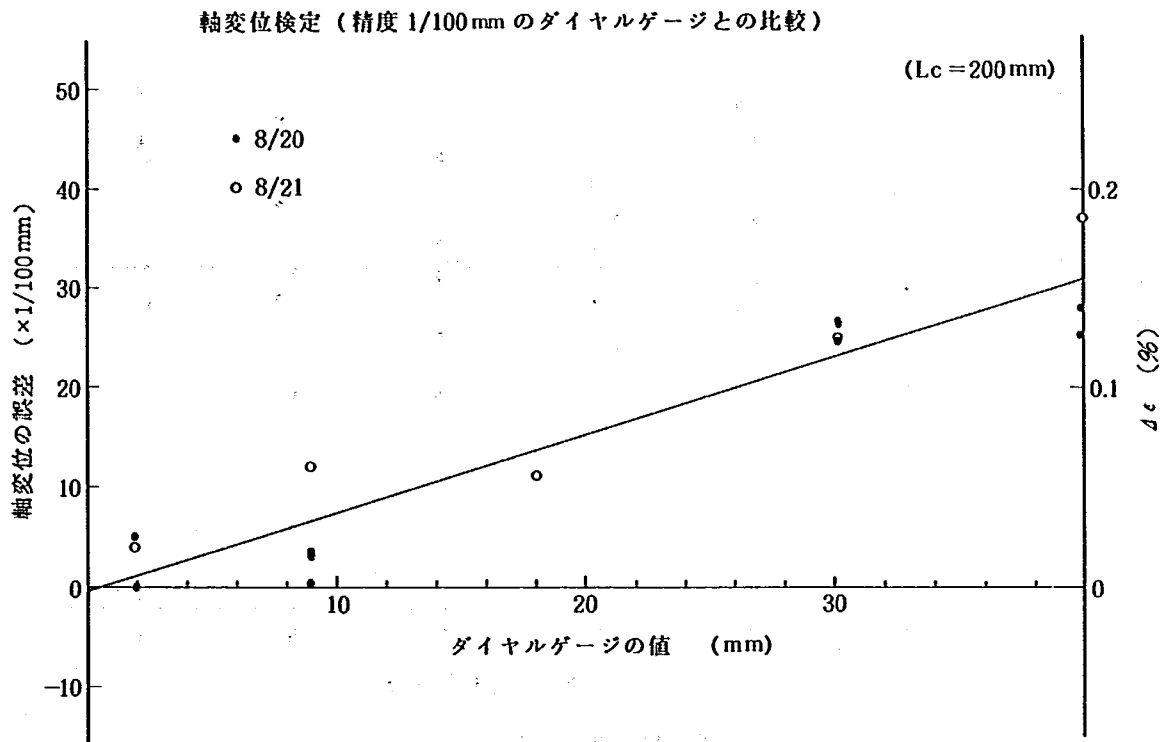


図-19 軸変位検定結果

4) 外体積変化

a) 検定方法

外体積変化量は下式に示すように、軸変位量 (AXD)、外体積測定用変位計の変位量 (SPD) および側圧 (σ_3) の関数となっているため、体積変化量の生じない鉄柱を供試体として用い、側圧を段階的にあげてその時のモニターの外体積変化量 (VLC) を読み取った。

$$VLC = \frac{78.5 (AXD + SPD)}{10} - A \sigma_3^B$$

A, B : 定数

b) 検定結果

側圧と外体積変化量との関係を図-20に示すが、外体積変化量の誤差は $\pm 2.5 \text{ cm}^3$ となる。

以上の検定結果をまとめて D30 試験時の測定精度とともに表-11に示す。

3.3.2 せん断速度に関する確認試験

1) 試験目的および方法

三軸圧縮試験において通常実施されているせん断速度の範囲内で、せん断速度の相違がロック材料の強度定数に与える影響を把握することを目的として以下の試験を行った。

三軸圧縮試験機、試験材料および供試体作成方法等は D10 試験と同一である。最大粒径は、19.1 mm とし、粒度分布は D10 試験と同じである ($U_c = 6$)。せん断は圧密後の間隙比 $e_c = 0.50$ を一致させて実施した。せん断速度は表-12に示すとおりである。

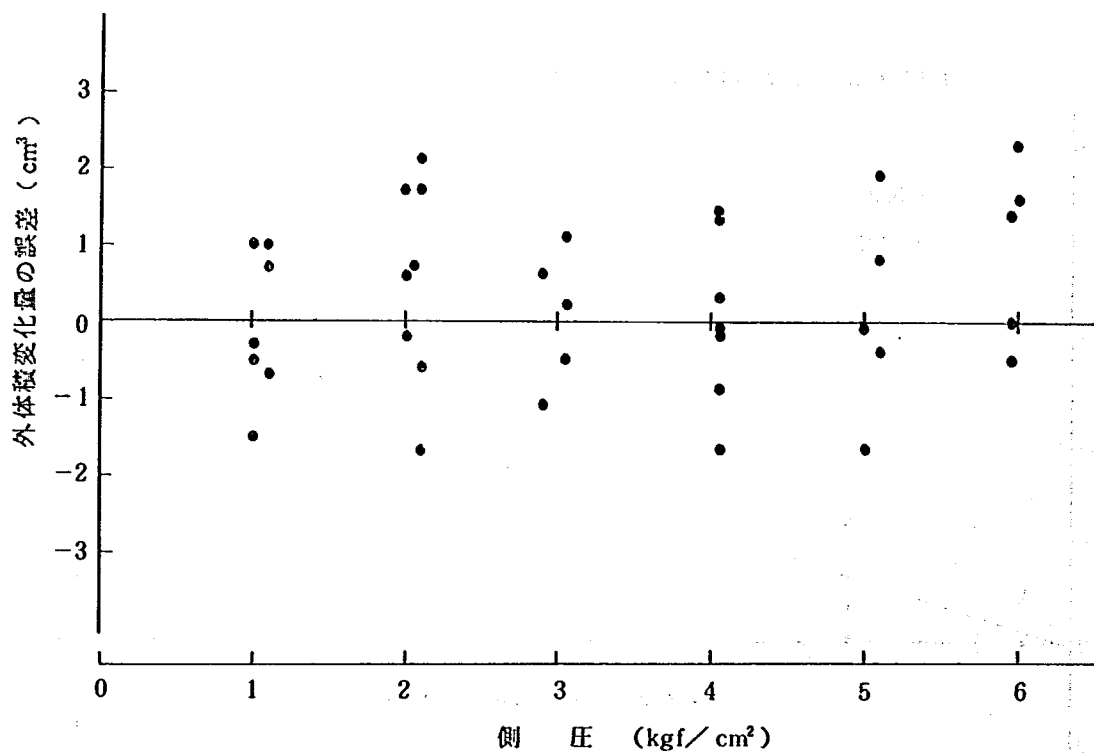


図-20 外体積変化検定結果

表-11 試験時の測定精度

試験機	測定項目	容 量	検 出 器 の 方 式	測定精度
D 10	軸 荷 重	5 tf	ヒズミゲージ・ホイストンブリッジ	± 15 kgf
	側 圧	30 kgf/cm ²	"	± 0.02 kgf/cm ²
	軸 変 位	100 mm	インダクタンス式	± 0.06 mm
	体 積 変 化	785 cm ³	加圧シリンダーの変位測定 インダクタンス式	± 2.5 cm ³
D 30	軸 荷 重	50 tf	ヒズミゲージ・ホイストンブリッジ	± 100 kgf
	側 圧	30 kgf/cm ²	"	± 0.05 kgf/cm ²
	軸 変 位	150 mm	ポテンシオメータ	± 0.2 mm
	体 積 変 化	10,000 cm ³	加圧シリンダーの変位測定 ポテンシオメータ	± 25 cm ³

表-12 三軸圧縮試験条件（せん断速度）

岩 種	班 れ い 岩
供 試 体 の 状 態	不飽和状態 ($W < 1\%$)
排 水 条 件	圧密排水試験 (CD)
せん断方法	側圧一定軸方向変位制御法
試験側圧 (kgf/cm^2)	2, 4, 6
圧密後間隙比 (e_c)	0.50
せん断速度 (%)	0.25, 0.50, 0.75, 1.00 1.25, 1.50, 1.75, 2.00

2) 試験結果

試験結果をまとめて表-13に示す。

側圧と最大軸差応力との関係を図-21に示す。

せん断速度と強度定数 ϕ および C との関係を図-22に示す。

せん断速度を0.25～2.00 %/min と8種類変えて行った結果、強度定数であるせん断抵抗角 ϕ と粘着力成分 C はそれぞれ

$$\phi = 40.8 \pm 0.4 \quad (\text{度})$$

$$C = 1.36 \pm 0.10 \quad (\text{kgf}/\text{cm}^2)$$

となり、せん断速度によるロック材料の強度定数に及ぼす影響は0.25%から2.0%という歪速度の範囲ではあまりないものと考えられる。

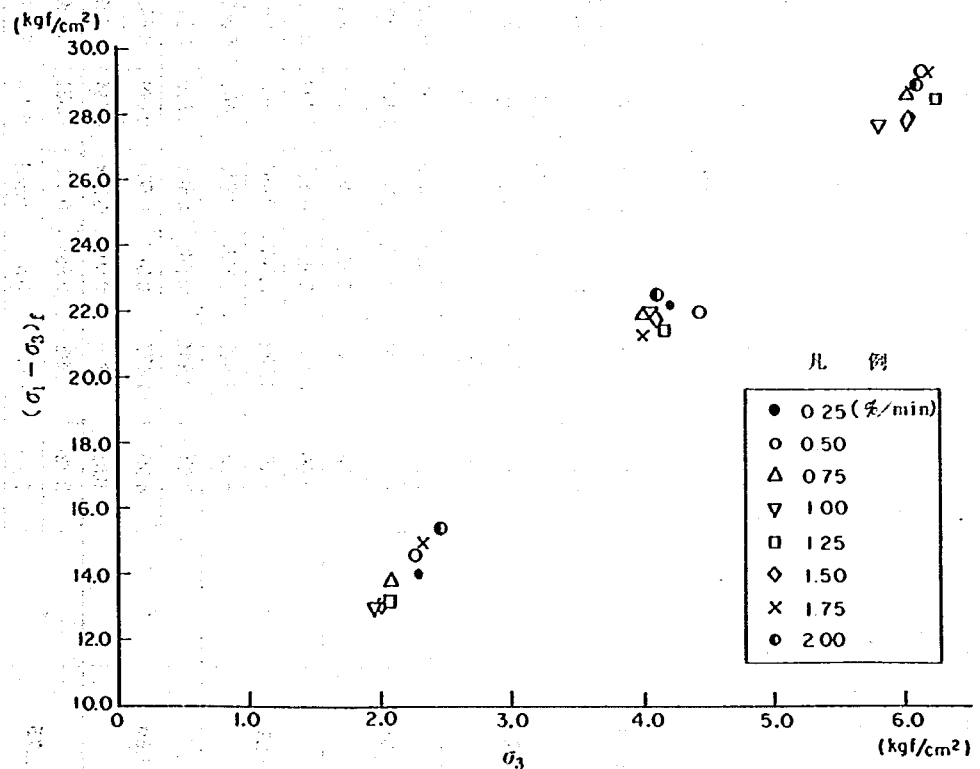


図-21 $\sigma_3 - (\sigma_1 - \sigma_3) f$

表-13 三軸圧縮試験結果一覧表（せん断速度）

粒 度	せん断速度 (%/min)	比 重 $\bar{G}_b$ 吸 水 率 $\bar{Q}$ (%)	側 圧 σ_3 (kgf/cm ²)	初期乾 燥密度 γ_d (g/cm ³)	間 隙 比				破 壊 時							E_{50} (kgf/cm ²)	三軸後 破碎率 (%)	強 度 定 数	
					初 期 e_o	圧密後 e_c	破壊時 e_f	e_c/e_o	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kgf/cm ²)	ϵ_f (%)	$(\Delta V/V_c)_f$ (%)	$(\sigma_1/\sigma_3)_f$	ϕ_o (度)	割線変 形係数 (kgf/cm ²)	せん断 抵抗角 ϕ (度)			粘 着 力 成 分 C (kgf/cm ²)	
D	0.25	$\bar{G}_b=2.950$ $\bar{Q}=0.45$	2.31	1.893	0.558	0.509	0.507	0.912	13.99	8.0	0.1	7.06	48.7	175	660	4.2	40.6	1.31	
			4.24	1.871	0.577	0.504	0.477	0.873	22.11	12.0	1.8	6.21	46.3	184	711	4.5			
			6.05	1.850	0.595	0.506	0.447	0.850	27.91	14.0	3.9	5.61	44.2	199	579	5.6			
"	0.50	"	2.26	1.883	0.567	0.514	0.512	0.907	14.59	9.4	0.1	7.46	49.8	155	586	2.8	41.0	1.30	
			4.41	1.868	0.579	0.508	0.475	0.877	22.01	11.3	2.2	5.99	45.6	195	712	4.4			
			6.13	1.856	0.589	0.504	0.444	0.856	29.42	13.6	4.0	5.80	44.9	216	649	4.8			
"	0.75	"	2.08	1.898	0.554	0.504	0.515	0.910	13.79	9.7	-0.7	7.63	50.2	142	628	2.8	40.9	1.42	
			3.98	1.876	0.572	0.493	0.468	0.862	21.93	11.4	1.7	6.51	47.2	192	734	6.1			
			6.01	1.851	0.594	0.501	0.441	0.843	28.71	13.6	4.0	5.78	44.8	211	605	5.2			
"	1.00	"	1.95	1.900	0.553	0.499	0.495	0.902	13.02	7.2	0.3	7.68	50.3	181	624	2.9	41.1	1.33	
			4.03	1.876	0.572	0.503	0.470	0.879	21.98	10.6	2.2	6.45	47.0	207	706	4.5			
			5.79	1.868	0.579	0.486	0.440	0.839	27.69	13.6	3.1	5.78	44.8	204	704	6.5			
"	1.25	"	2.06	1.903	0.550	0.496	0.499	0.902	13.19	10.1	-0.2	7.40	49.6	131	579	3.1	40.4	1.33	
			4.15	1.882	0.567	0.491	0.455	0.866	21.46	10.3	2.4	6.17	46.2	208	688	4.2			
			6.23	1.849	0.595	0.516	0.461	0.867	28.58	15.0	3.6	5.59	44.1	191	745	6.4			
"	1.50	"	2.02	1.904	0.549	0.504	0.510	0.918	13.18	8.1	-0.4	7.52	49.9	163	717	3.4	40.5	1.38	
			4.09	1.877	0.572	0.509	0.479	0.890	21.76	13.3	2.0	6.32	46.6	164	637	6.3			
			6.01	1.849	0.595	0.504	0.444	0.847	27.94	14.4	4.0	5.65	44.4	194	604	5.1			
"	1.75	"	2.32	1.898	0.554	0.513	0.521	0.926	14.52	7.8	-0.5	7.26	49.3	186	657	3.0	41.2	1.28	
			3.99	1.879	0.570	0.501	0.481	0.879	21.26	11.9	1.3	6.33	46.6	179	761	5.0			
			6.16	1.852	0.593	0.508	0.451	0.857	29.38	12.4	3.8	5.77	44.8	237	659	6.1			
"	2.00	"	2.45	1.902	0.551	0.513	0.522	0.931	15.43	9.7	-0.6	7.30	49.4	159	772	4.1	40.6	1.52	
			4.09	1.875	0.573	0.494	0.458	0.862	22.47	14.5	2.4	6.49	47.2	155	625	5.7			
			6.08	1.848	0.596	0.501	0.450	0.841	29.05	13.7	3.4	5.78	44.8	212	698	6.1			

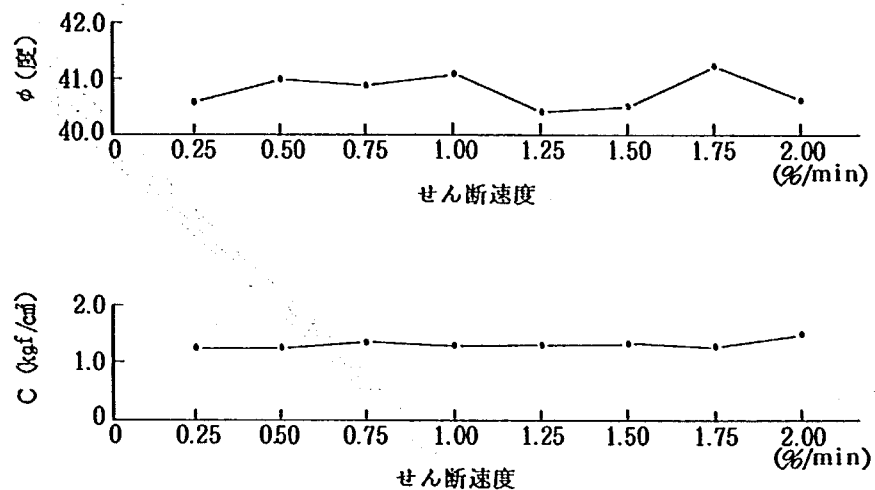


図-22 せん断速度と ϕ および C

3.3.3 供試体端面処理に関する確認試験

1) 試験目的および方法

今回実施した D10 および D30 の三軸圧縮比較試験において、供試体の上下端面を平滑にするために端面処理を行った。そこで、供試体端面処理の有無およびその方法が、ロック材料の強度定数に与える影響を把握する目的で以下の試験を実施した。

試験方法はすべて D30 試験と同様である。最大粒径は 63.5 mm とし、圧密後の間隙比 ($e_c = 0.435$) を一致させた。端面処理方法を表-14 に示す。

表-14 供試体端面処理方法 (確認試験)

試験ケース	粒 径 (mm)	下 端 面 処 理			上 端 面 処 理		
		粒 径 (mm)	厚 さ (mm)	投入量 (gf)	粒 径 (mm)	厚 さ (mm)	投入量 (gf)
A	63.5 ~ 2.00	—	—	—	—	—	—
B	"	9.52 ~ 2.00	13	1300	9.52 ~ 2.00	凹所を埋める厚さ	700
C	"	4.76 ~ 2.00	6.5	700	4.76 ~ 2.00	"	500
D	"	9.52 ~ 2.00	6.5	650	9.52 ~ 2.00	"	500

2) 試験結果

試験結果をまとめて表-15 に示す。

側圧と最大軸差応力との関係を図-23 に示す。

端面処理方法を 3 種類変えて行った結果、強度定数であるせん断抵抗角 ϕ と粘着力成分 C は無処理の場合を基準としてそれぞれ

$$\phi = 41.1 \pm 0.2 \quad (\text{度})$$

$$C = 1.4 \pm 0.1 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

となり、端面処理によるロック材料の強度定数に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。

3.3.4 締固め試験

1) D10 の締固め試験

D10 の締固めは次の 2 通りの方法で行った。

(突固めによる方法)

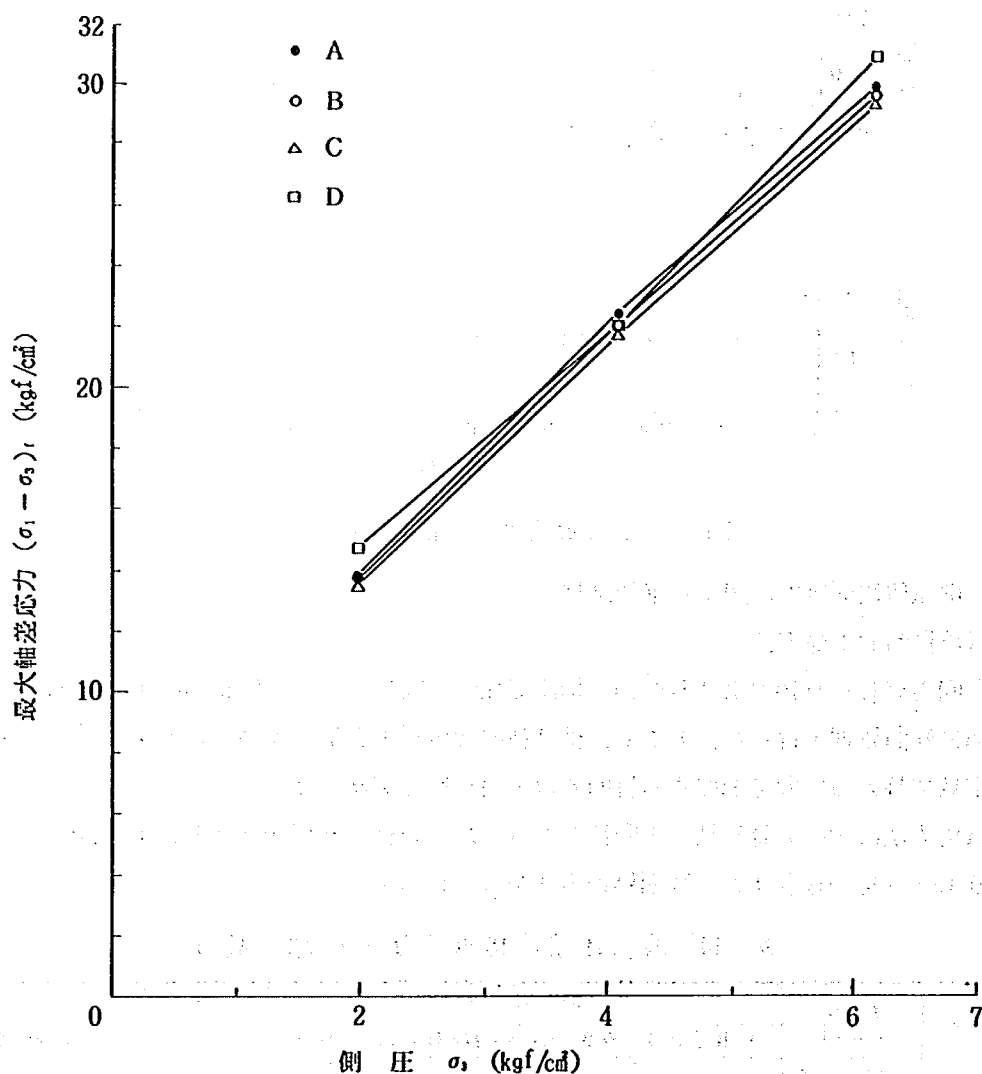


図-23 側圧と最大軸差応力（端面処理）

表-15 三軸圧縮試験結果一覧表（端面処理）

粒 度	ケース名	比重 $\bar{G}_b$ 吸水率 $\bar{Q}$ (%)	側圧 σ_2 (kgf/cm ²)	初期乾 機密度 ρ_d (g/kd)	間 隙 比				破 壊 時							三軸後 破砕率 (%)	強度定数	
					初期 e_s	圧密後 e_c	破壊時 e_f	e_s/e_c	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kgf/cm ²)	ϵ_f (%)	$(\Delta V/V_c)_f$ (%)	$(\sigma_1/\sigma_3)_f$	ϕ_s (度)	割線変 形係数 (kgf/cm ²)	E_{45} (kgf/cm ²)		せん断 抵抗角 ϕ (度)	粘着力 成分 CO (kgf/cm ²)
G	A	$\bar{G}_b = 3.015$ $\bar{Q} = 0.55$	2.0	2.045	0.474	0.434	0.447	0.916	13.74	6.9	-0.9	7.87	50.8	199	1374	9.2	41.1	1.4
			4.1	2.024	0.490	0.434	0.419	0.886	22.41	7.8	1.1	6.60	47.1	287	1121	9.0		
			6.2	2.006	0.503	0.434	0.402	0.863	29.84	12.4	2.2	5.97	45.0	241	1105	10.8		
G	B	"	2.0	2.041	0.477	0.436	0.444	0.914	13.67	7.2	-0.6	7.84	50.7	190	976	4.1	40.9	1.4
			4.1	2.014	0.497	0.434	0.413	0.873	21.95	10.5	1.5	6.49	46.7	209	871	6.2		
			6.2	2.000	0.508	0.436	0.396	0.898	29.58	9.9	2.8	5.93	44.8	299	1020	8.6		
G	C	"	2.0	2.037	0.480	0.436	0.445	0.908	13.39	7.2	-0.7	7.70	50.4	186	1263	5.0	40.9	1.4
			4.1	2.019	0.493	0.435	0.421	0.884	21.68	9.2	1.1	6.42	46.5	236	1023	6.1		
			6.2	1.996	0.511	0.436	0.397	0.853	29.28	13.8	2.7	5.88	44.6	212	856	12.2		
G	D	"	2.0	2.039	0.479	0.432	0.458	0.902	14.67	9.8	-0.8	8.34	51.8	150	917		41.2	1.5
			4.1	2.019	0.493	0.436	0.417	0.894	22.05	7.9	1.3	6.33	46.8	279	975	7.6		
			6.2	1.988	0.517	0.432	0.383	0.836	30.85	13.1	3.0	5.98	45.5	235	834			

含水比を一定（三軸圧縮試験時と同じ）にし、締固め方法は突固めによる土の締固め試験方法（JIS A 1210 T-1979）の第1法（2.5 kgf ランマー、10 cm モールド、3層25回突固め）に準拠した。なお、密度はモールドに投入する土の質量をあらかじめ定めておき、締固め後の体積を測定することによって求めた。最大粒径 19.1 mm については、3層25回突固めを 1.0 E として、0.5 E、1.0 E、2.0 E、3.0 E、4.0 E と突固めエネルギーを変化させて試験した。

（打撃による方法）

3.2.4 で述べた三軸圧縮試験用の供試体作成方法と同様の方法で行った。打撃回数は各層の密度がほぼ一定の値になるまで（80～100回）とした。なお、第5層締固め後の値を試験値とした。

締固め試験の結果を表-16および図-24、25に示す。（付図-3～7）

最大粒径 19.1 mm において S.56 試験と同一の初期間隙比（ $e_0 = 0.45$ ）とするためには、図-24に示すように突固めエネルギーを 2.6 E としなければならない。2.6 E 時の粒子破碎率は 5.9 % と S.56 試験時における粒子破碎率と比較して大きい。また、1.0 E における粒子破碎率も最大 5.4 %（ $d_{max} = 25.4$ mm）と大きく、突固めによる方法は、 $e_0 = 0.45$ を達成するための締固め方法として適切ではないと思われる。

打撃による方法の粒子破碎率は最大 2.7 % である。したがって、締固め時の粒子破碎を考慮して、三軸圧縮試験用供試体の締固め方法は打撃による方法で実施することとした。なお、 e_0 一定試験における供試体初期間隙比の設定には最大粒径 4.76 mm の最小間隙比である 0.56 を採用した。（図-25）

最小密度試験を以下の手順で行った。

- ① 試料は試験粒度分布に従い、各粒径毎に必要量を3等分して上皿電子天びんにて計量する。試料の全量は 2010 gf とする。
- ② ①で準備した試料を各層とも -9.52 mm は試料分取器で、また +9.52 mm については目分量で4等分する。
- ③ ②で準備した -9.52 mm と +9.52 mm の試料を各々混合し、標準締固め用モールド（内径 10 cm、高さ 12.7 cm）にスプーンを使用して、試料面に接するような状態で静かに投入する。
- ④ 供試体高さを9点測定し、その平均値より密度を算定する。

なお、最大粒径 25.4 mm については、 ϕ 15 cm モールドを用いても同様の方法で行った。（試料全量 4200 gf）

最小密度試験の結果を表-17に示す。

最小密度試験結果を最大間隙比（ e_{max} ）、突固めによる方法（1.0 E）および打撃による方法から求められた値を最小間隙比（ e_{min} ）として、三軸圧縮試験時の相対密度（ D_r ）を次式により算定すると表-18のようである。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 (\%)$$

打撃による方法に対する相対密度は、 $e_0 = 0.56$ で 80～100 %、 $e_c = 0.53$ で 90～110 % であり、最大粒径が大きくなるほど小さな値を示している。

表-16 D10の締固め試験結果

最大粒径 dmax(mm)	突 固 め に よ る 方 法						打 撃 に よ る 方 法			
	No	乾 燥 密 度 rd (g/cm ³)		間 隙 比 e		破 砕 率 B (%)		乾燥密度 rd(g/cm ³)	間 隙 比 e	破 砕 率 B (%)
		測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値			
2.00	1	1.844	1.850	0.607	0.602	3.8	4.2	1.888	0.570	2.2
	2	1.857		0.596		4.2				
	3	1.848		0.604		4.5				
4.76	1	1.914	1.898	0.542	0.555	3.3	3.4	1.892	0.560	2.6
	2	1.883		0.568		3.6				
	3	1.898		0.556		3.2				
9.52	1	1.908	1.901	0.530	0.536	3.9	4.0	1.917	0.523	2.7
	2	1.878		0.555		4.1				
	3	1.916		0.524		3.9				
19.1	1	1.929	1.946	0.529	0.516	5.1	4.4	1.956	0.508	1.7
	2	1.968		0.498		3.4				
	3	1.941		0.520		4.6				
25.4	1	1.976	1.967	0.492	0.499	6.1	5.4	1.957	0.506	1.8
	2	1.959		0.504		5.7				
	3	1.965		0.500		4.3				

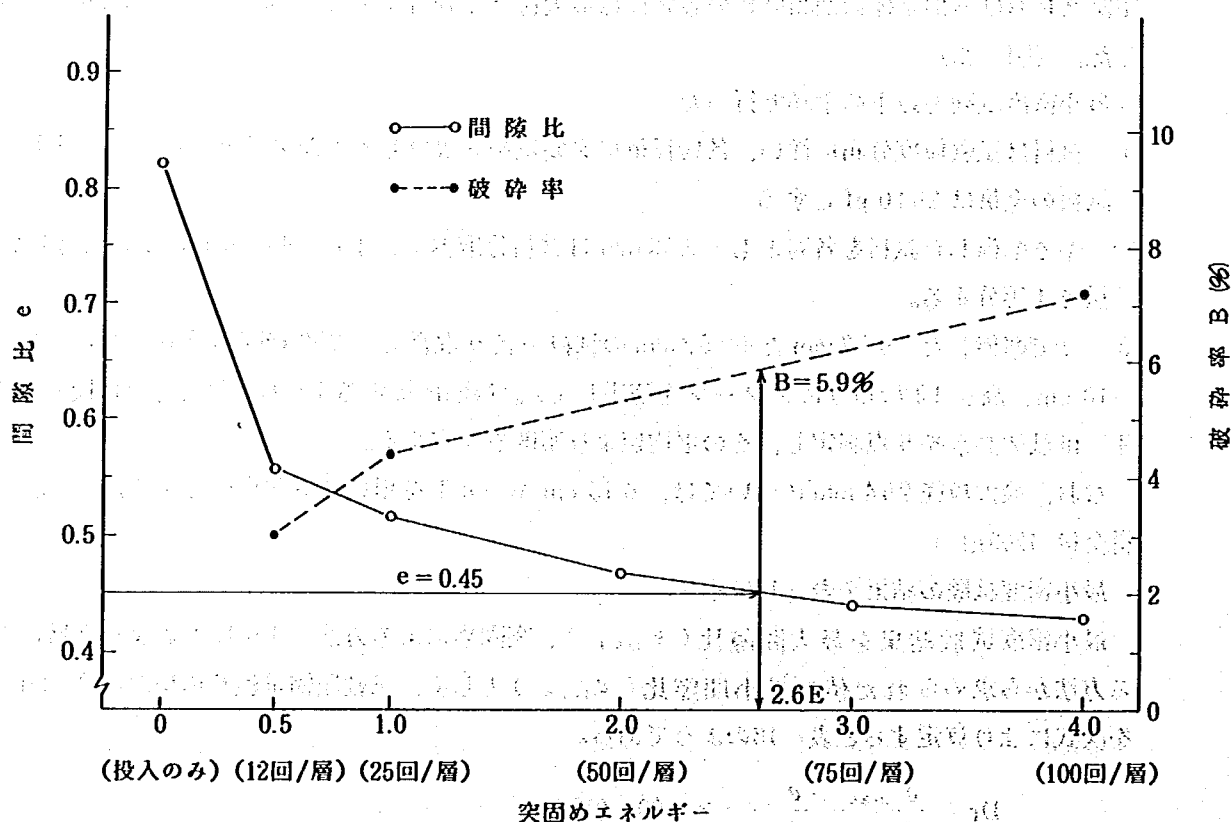


図-24 D10締固め試験結果(突固めによる方法 dmax=19.1 mm)

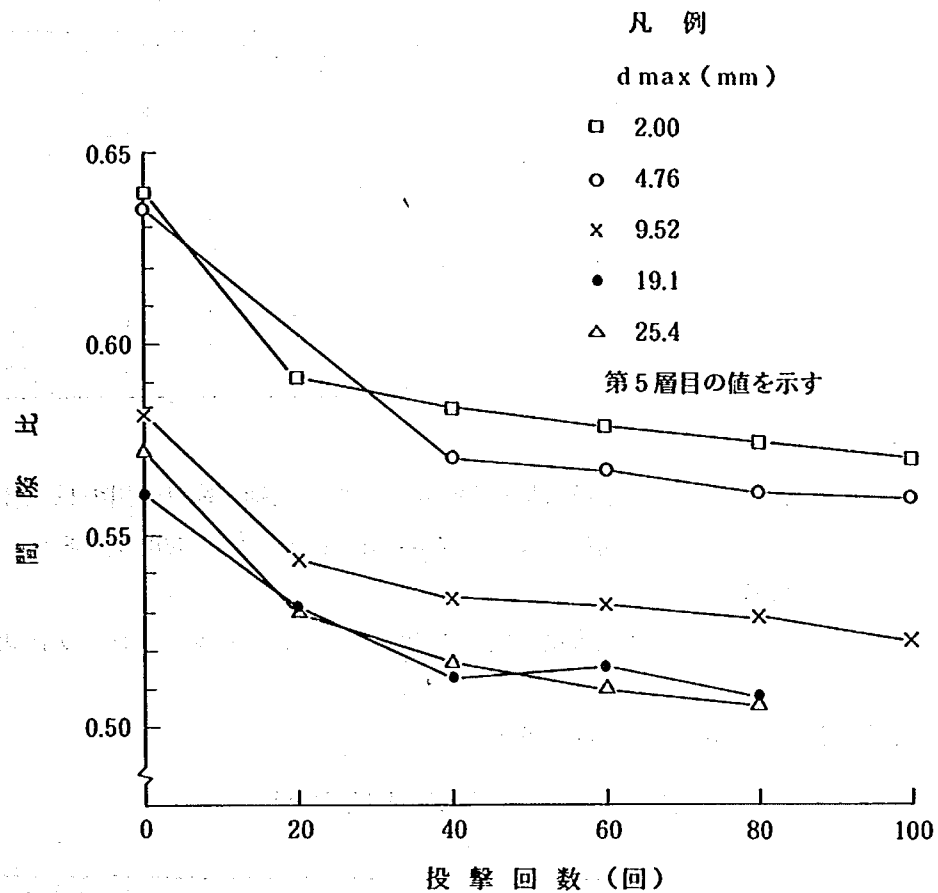


図-25 D10締固め試験結果(打撃による方法)

表-17 D10の最小密度試験結果(e_{max})

最大粒径 dmax (mm)	測定者	1 回 目	2 回 目	3 回 目	平 均 間 隙 比		備 考
2.00	A	0.973	0.967	0.983	0.974	0.976	φ10cm モールド
	B	0.975	0.970	0.986	0.977		
4.76	A	0.904	0.923	0.952	0.926	0.923	"
	B	0.900	0.918	0.943	0.920		
9.52	A	0.838	0.843	0.873	0.851	0.853	"
	B	0.846	0.852	0.868	0.855		
19.1	A	0.798	0.831	0.842	0.824	0.825	"
	B	0.809	0.826	0.843	0.826		
25.4	A	0.861	0.841	0.827	0.843	0.845	"
	B	0.854	0.850	0.839	0.848		
25.4	A	0.790					φ15cm モールド
	B	0.797					

表-18 D10の相対密度一覧表

最大粒径 dmax(mm)	e_{max}	e_{min} (打撃法)	e_{min} (突固め法)	e_{min} (打撃法)に対する相対密度		e_{min} (突固め法)に対する相対密度		
				$e_s = 0.56$	$e_s = 0.53$	$e_s = 0.56$	$e_s = 0.53$	
200	0.976	0.570	0.602	100	107	109	119	$e_s = 0.570$ $e_s = 0.540$
4.76	0.923	0.560	0.555	100	108	99	107	
9.52	0.853	0.523	0.536	89	98	92	102	
19.1	0.825	0.508	0.516	84	93	86	95	
25.4	0.845	0.506	0.499	84	93	82	91	dmaxはφ10cm モールド使用
25.4	0.794	"	"	81	92	79	89	dmaxはφ15cm モールド使用

2) D30の締固め試験

D30の締固め試験は試料の総絶乾重量を 78 kg として、三軸圧縮試験用の供試体作成方法と同様の方法で行った。締固め時間は、最大粒径 63.5mm については 480 秒、38.1, 19.1, 9.52 mm については 120 秒とした。

最小密度試験は、試料の総絶乾重量を同じく 78 kg として、ハンドスコップにより静かに投入して行った。

試験結果を表-19に示す。(付図-8~11)

表-19 D30の締固め試験結果

最大粒径 dmax(mm)	e_{max} (最小密度試験)	e_{min} (締固め試験)	Dr(%) ($e_s = 0.435$)	締固め試験時の 破砕率 B (%)
63.5	0.803	0.333※	78	12.6
38.1	0.802	0.332	78	7.0
19.1	0.844	0.389	90	3.5
9.52	0.832	0.400	92	3.5

※ 締固め時間 120 秒の時の値

最大粒径 63.5 mm の破砕率は、締固め時間が他と比較して長いため 12.6% と大きな値を示している。相対密度は 80~90% で、D10 と同様に最大粒径が大きくなるほど小さな値を示している。

以上の試験結果を S.56 試験結果とともに最大粒径と間隙比との関係としてまとめて図-26 に示す。この図より以下に示す傾向がある。

- ① 最大間隙比についてはモールド径は異なるが試験方法はほぼ同じである。最大粒径が 25.4 mm 程度以上ではほぼ同じ値を示すが、最大粒径が 9.52~25.4 mm より小さくなると最大間隙比は大きくなる傾向がある。また、最大粒径とモールド径との比 d_{max}/D が 1/5 程度以上になると、最大間隙比の値に影響を与えるようである。
- ② 最小間隙比についてはモールド径および締固め方法が異なる。したがって、単純に比較はできないが、最大間隙比と同様の傾向を示すようである。

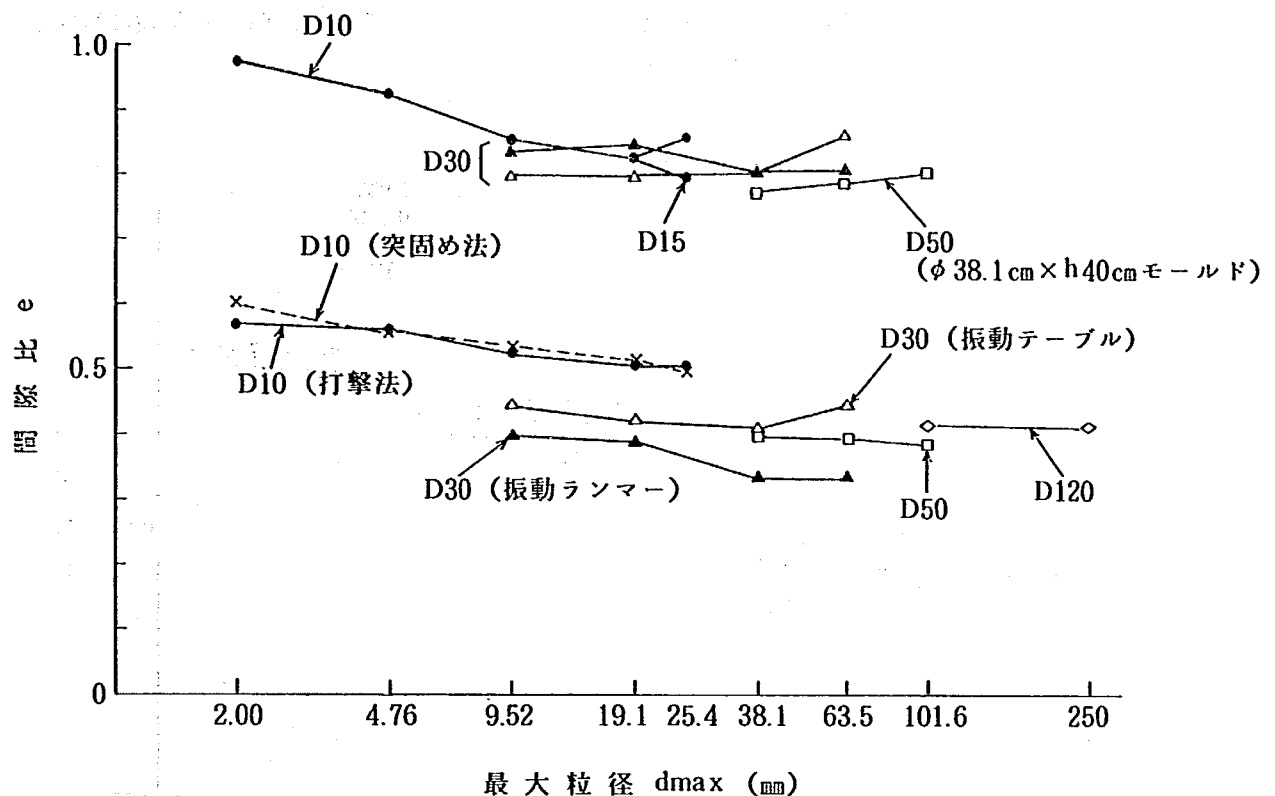


図-26 締固め試験結果

3.3.5 三軸圧縮試験

1) 圧密

D10試験における圧密経過時間と圧密体積変化量との関係および側圧と圧密体積変化量との関係をそれぞれ図-27および図-28に示す。

供試体の体積変化は、三軸室内の供試体体積変化に伴って三軸室内の加圧水量が増減する量を測定した。したがって体積測定値の精度を上げるために三軸室内に気泡が残らないように石けん水を塗るとともに5時間以上真空吸引した脱気水を使用した。

D30試験における圧密経過時間と圧密体積変化量との関係を図-29に示す。

側圧を一定にした後、圧密完了基準を満足するまでに要した時間はD10で10分程度、D30で5分程度である。なお、最大粒径が19.1mmの場合を代表として図に示したが、他のケースについても同様の傾向を示している。

最大粒径および側圧に対応した圧密体積ひずみを図-30および図-31に示す。

圧密体積ひずみは側圧とともに増加している。また、最大粒径が大きくなると圧密体積ひずみも増加している。これらには、ゴムスリプ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（ゴム膜貫入量）の影響があるものと考えられる。

e_c 一定試験における初期間隙比 e_0 の設定は同一岩種、同一粒度分布で同じ側圧を載荷した場合、 e_c と e_0 との比すなわち e_c/e_0 値がほぼ一定している事に着目して行った。当研究室で過去に実施した試験データを e_c/e_0 に着目して整理すると図-32のようになる。データ数が小さく、岩種及び均等係数により若干異なる値を示しているが、 σ_3 が1.5から6.0 kgf/cm²

の間で e_c/e_o 値はほぼ 0.75 から 0.90 の値を示すようである。ここでは、 e_o 一定試験における e_c/e_o 値より e_c 一定試験の e_o を算定した。

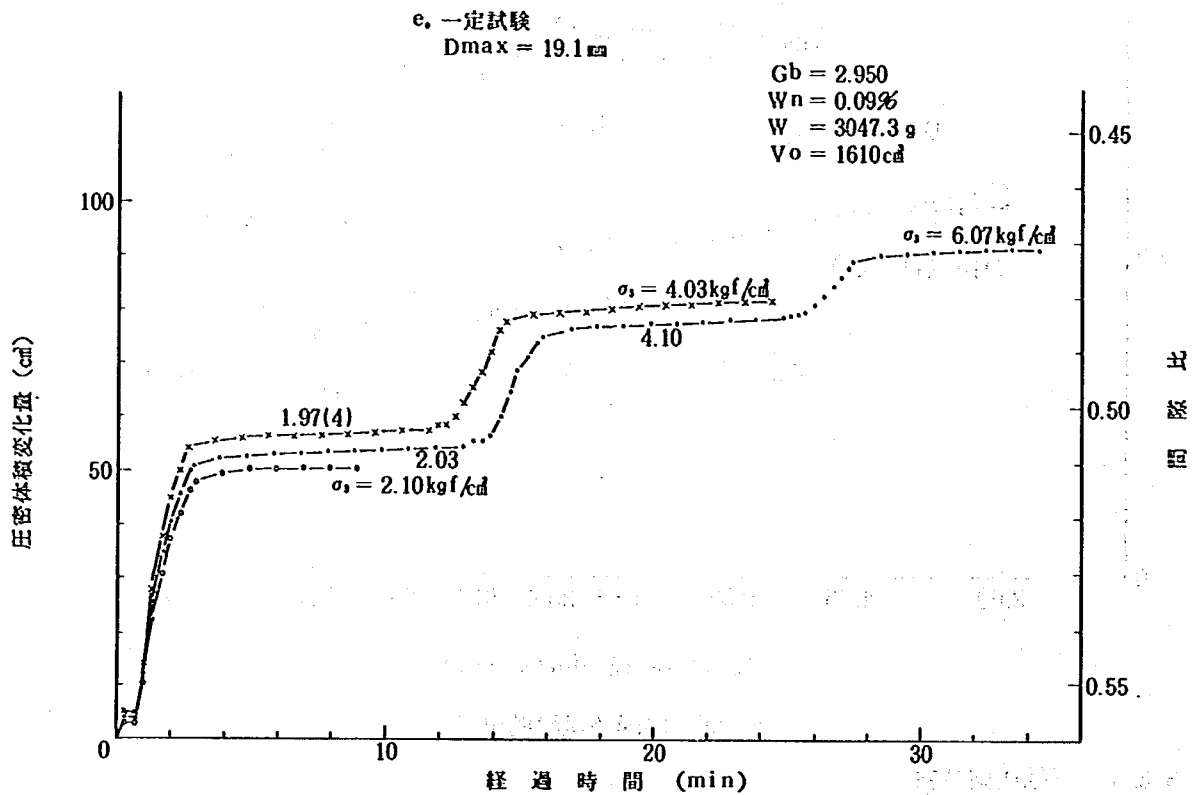


図-27 圧密経過時間と圧密体積変化量 (D10)

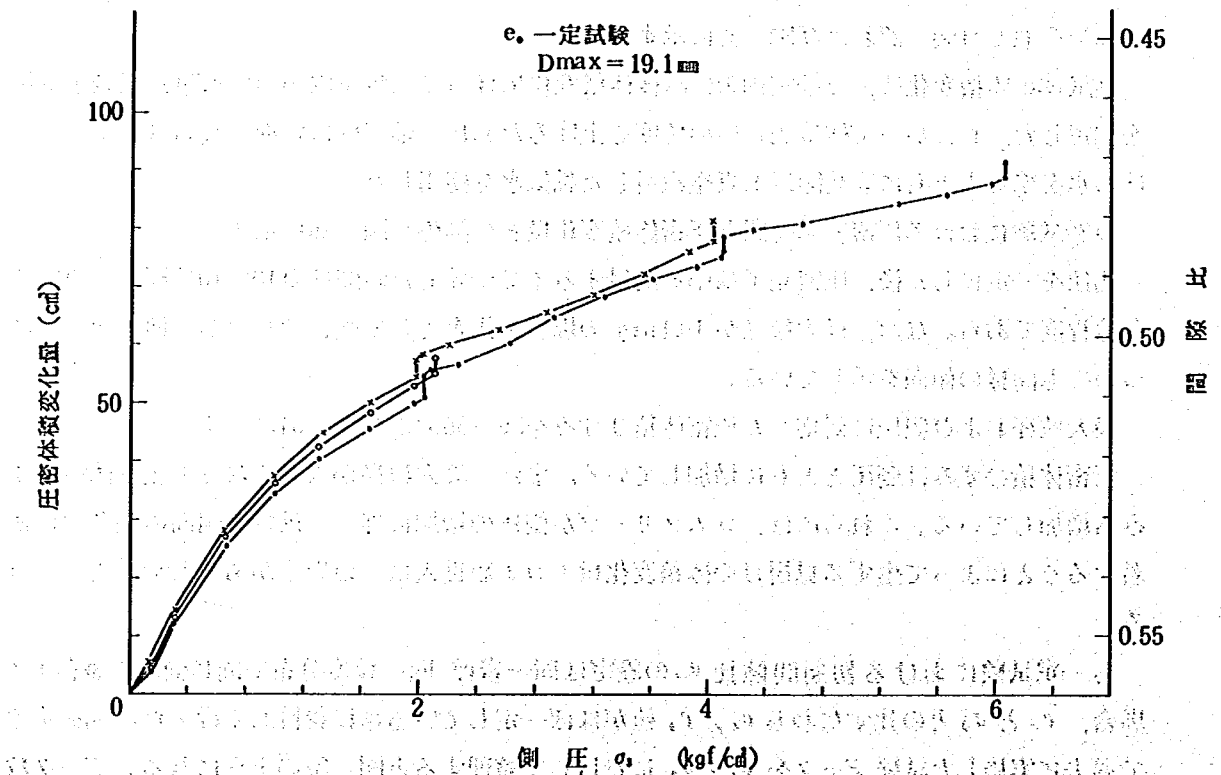


図-28 側圧と圧密体積変化量 (D10)

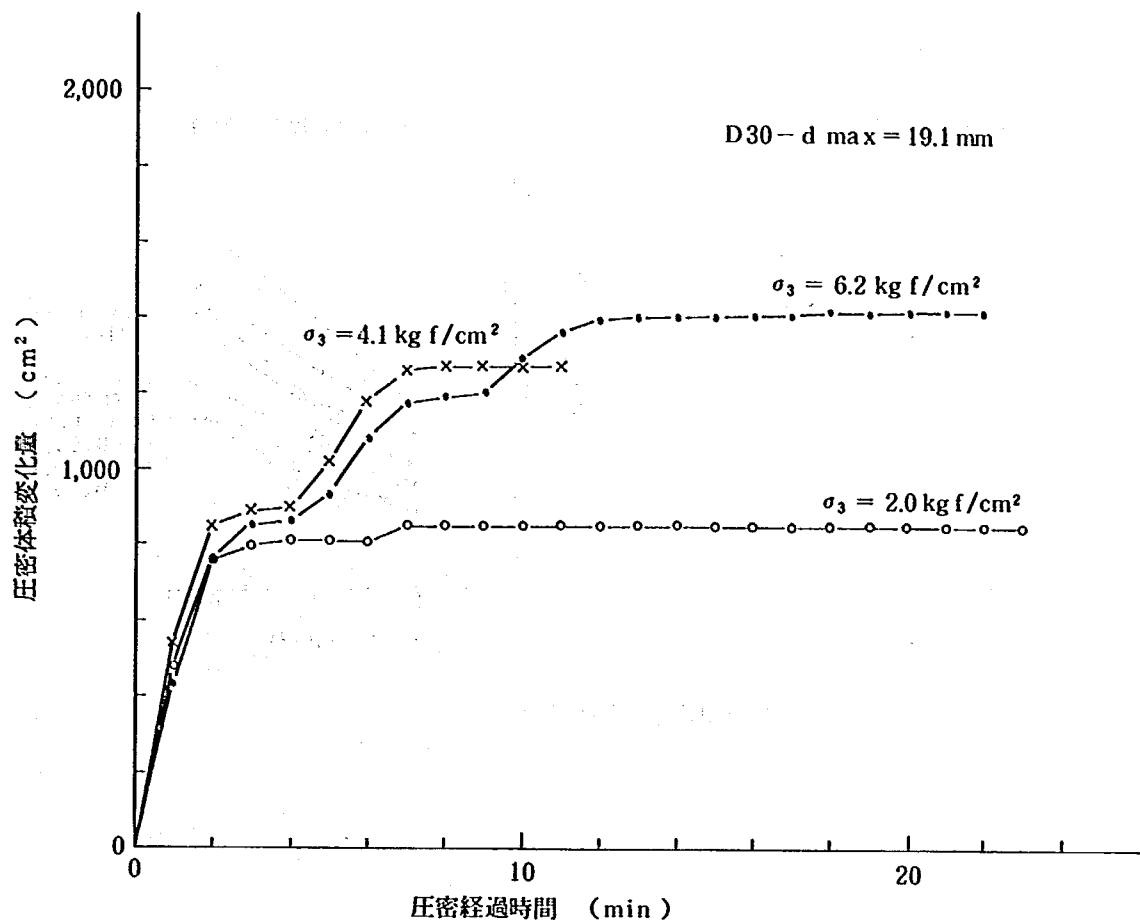


図-29 圧密経過時間と圧密体積変化量 (D30)

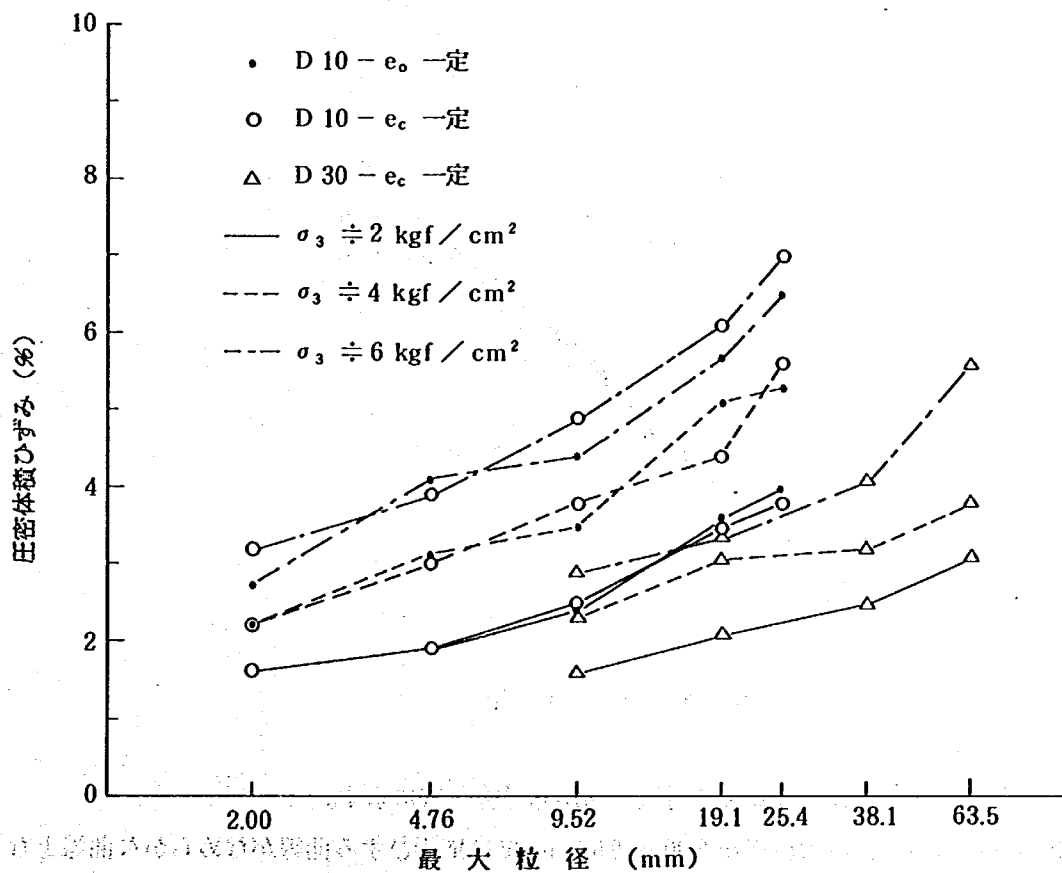


図-30 最大粒径と圧密体積ひずみ

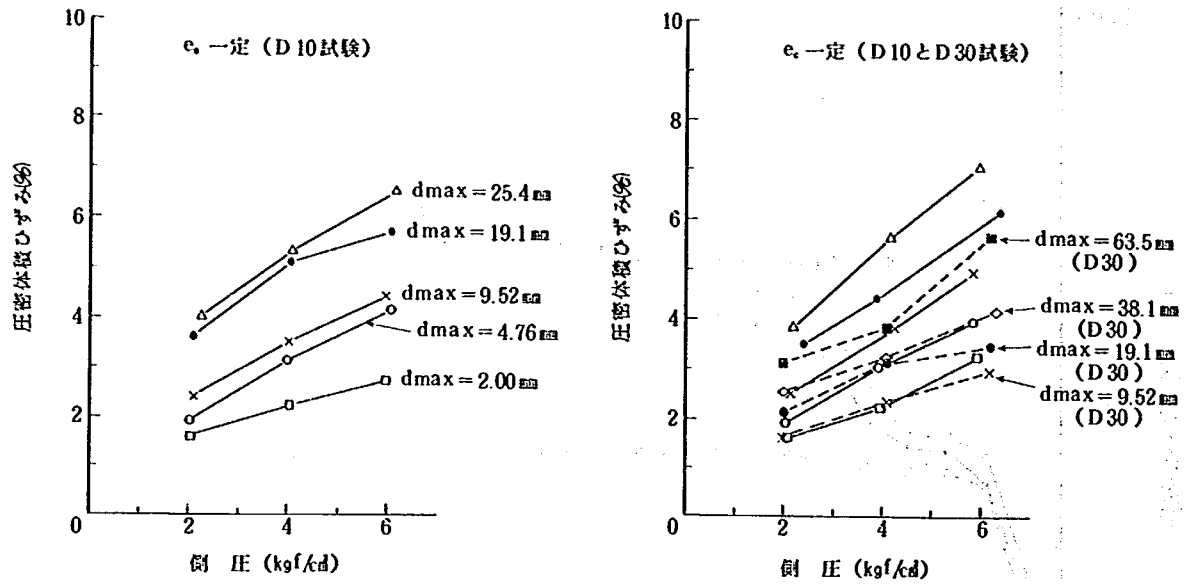


図-31 側圧と圧密体積ひずみ

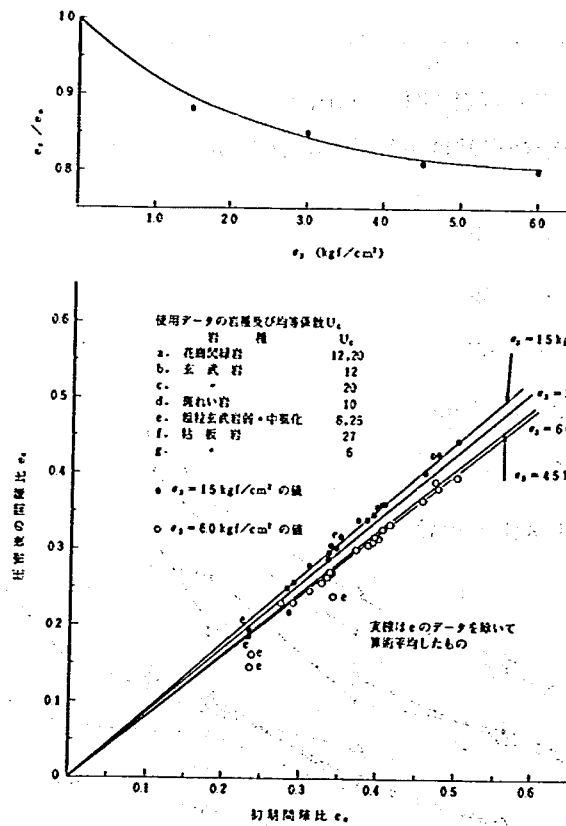


図-32 σ_3 と e_c / e_0

2) 応力ひずみ曲線

各試験ケースの応力ひずみ曲線を付図-14から付図-27に示す。

D 10試験において、最大粒径が 2.00 ~ 9.52 mm では応力ひずみ曲線がなめらかな曲線となっているが、19.1 mm では若干凹凸が生じ、25.4 mm になると凹凸がさらにはげしくなる。応力

ひずみ曲線に凹凸があると、最大軸差応力を求める時判断に迷うところである。応力ひずみ曲線がなめらかな場合には、最大軸差応力の生ずる軸ひずみは側圧の増加とともに増加している。しかし、応力ひずみ曲線に凹凸がある場合には、最大軸差応力の生ずる軸ひずみに一定の傾向がなく、また凸部を最大値とすることは不自然と思われる。したがって、応力ひずみ曲線に凹凸のあるD10の最大粒径が19.1 mmと25.4 mmについては、応力ひずみ曲線をなめらかな曲線に修正し、最大軸差応力の生ずる軸ひずみの傾向も考慮して最大軸差応力を求めた。なお、応力ひずみ曲線を修正して求めた最大軸差応力と修正しない値との差は、最大粒径が19.1 mmおよび25.4 mmでそれぞれ0.03 ~ 0.21 kgf/cm² および0.12 ~ 0.5 kgf/cm² である。

側圧と破壊時の軸ひずみおよび体積ひずみとの関係を図-33に示す。

試験時の各測定誤差(表-11)により生ずる最大軸差応力の誤差を次式で求める。

$$f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{Q(1 - \epsilon_a)}{A_c(1 - \epsilon_v)} - \sigma_3$$

$$\Delta f = \pm \sqrt{\left\{ \frac{1 - \epsilon_a}{A_c(1 - \epsilon_v)} \right\}^2 \Delta Q^2 + \left\{ \frac{-Q}{A_c(1 - \epsilon_v)} \right\}^2 \Delta \epsilon_a^2 + \left\{ \frac{QA_c(1 - \epsilon_a)}{A_c(1 - \epsilon_v)^2} \right\}^2 \Delta \epsilon_v^2 + \left\{ \frac{-Q(1 - \epsilon_a)}{(1 - \epsilon_v)A_c^2} \right\}^2 \Delta A_c^2 + \Delta \sigma_3^2}$$

$$\epsilon_a = \frac{\Delta H_f}{H_o - \Delta H_c} \quad \epsilon_v = \frac{4 \Delta V_f}{\pi D_o^2 H_o - 4 \Delta V_c} \quad A_c = \frac{\pi D_o^2 H_o - 4 \Delta V_c}{4(H_o - \Delta H_c)}$$

$$\Delta \epsilon_a = \pm \sqrt{\left\{ \frac{1}{H_o - \Delta H_c} \right\}^2 \Delta H_f^2 + \left\{ \frac{-\Delta H_f}{(H_o - \Delta H_c)^2} \right\}^2 \Delta H_o^2 + \left\{ \frac{\Delta H_f}{(H_o - \Delta H_c)^2} \right\}^2 \Delta H_c^2}$$

$$\Delta \epsilon_v = \pm \sqrt{\left\{ \frac{4}{\pi D_o^2 H_o - 4 \Delta V_c} \right\}^2 \Delta V_f^2 + \left\{ \frac{-8 \Delta V_f \pi D_o H_o}{(\pi D_o^2 H_o - 4 \Delta V_c)^2} \right\}^2 \Delta D_o^2}$$

$$+ \left\{ \frac{-4 \Delta V_f \pi D_o^2}{(\pi D_o^2 H_o - 4 \Delta V_c)^2} \right\}^2 \Delta H_o^2 + \left\{ \frac{16 \Delta V_f}{(\pi D_o^2 H_o - 4 \Delta V_c)^2} \right\}^2 \Delta V_c^2$$

$$\Delta A_c = \pm \sqrt{\left\{ \frac{\pi D_o H_o}{2(H_o - \Delta H_c)} \right\}^2 \Delta D_o^2 + \left\{ \frac{4 \Delta V_c - \Delta H_c \pi D_o^2}{4(H_o - \Delta H_c)^2} \right\}^2 \Delta H_o^2}$$

$$+ \left\{ \frac{-1}{H_o - \Delta H_c} \right\}^2 \Delta V_c^2 + \left\{ \frac{\pi D_o^2 H_o - 4 \Delta V_c}{4(H_o - \Delta H_c)^2} \right\}^2 \Delta H_c^2$$

f ; 最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kgf/cm²)

σ_1 ; 破壊時最大主応力 (kgf/cm²)

σ_3 ; 破壊時最小主応力 (kgf/cm²)

Q ; 破壊時軸荷重 (kgf)

ϵ_a ; 破壊時軸ひずみ

ϵ_v ; " 体積ひずみ

D_o ; 供試体の初期直径 (cm)

H_o ; " 初期高さ (cm)

ΔH_c ; 圧密時の供試体高さ変位 (cm)

ΔV_c ; " 供試体体積変化 (cm^3)

ΔH_f ; 破壊時の供試体高さ変位 (cm)

ΔV_f ; " 供試体体積変化 (cm^3)

Δf ; f の誤差 (kgf/cm^2)

ΔQ ; Q の誤差 (kgf)

$\Delta \epsilon_a$; ϵ_a の誤差

$\Delta \epsilon_v$; ϵ_v "

ΔA_c ; A_c " (cm^2)

$\Delta \sigma_3$; σ_3 " (kgf/cm^2)

ΔD_o ; D_o " (cm)

ΔH_o ; H_o " (cm)

$\Delta \Delta H_c$; ΔH_c " (cm)

$\Delta \Delta H_f$; ΔH_f " (cm)

$\Delta \Delta V_f$; ΔV_f " (cm^3)

$\Delta \Delta V_c$; ΔV_c " (cm^3)

各試験ケースの最大軸差応力の誤差を表-20に示す。

表-20 最大軸差応力の誤差
(検出器の誤差のみ)

	側 圧 σ_s (kgf/cm ²)	最 大 粒 径 d_{max} (mm)						
		2.00	4.76	9.52	19.1	25.4	38.1	63.5
D 10 e_c 一定	2	12.73 ± 0.20	11.94 ± 0.20	12.26 ± 0.20	13.5 ± 0.20	14.7 ± 0.20	—	—
	4	21.66 ± 0.20	20.63 ± 0.21	20.09 ± 0.21	21.9 ± 0.21	23.3 ± 0.21	—	—
	6	28.77 ± 0.21	28.10 ± 0.21	26.98 ± 0.21	28.6 ± 0.22	32.0 ± 0.22	—	—
D 10 e_c 一定	2	—	—	12.21 ± 0.20	13.8 ± 0.20	14.4 ± 0.19	—	—
	4	20.47 ± 0.20	19.59 ± 0.20	20.25 ± 0.20	20.2 ± 0.20	22.4 ± 0.20	—	—
	6	27.84 ± 0.21	25.94 ± 0.21	25.57 ± 0.21	27.5 ± 0.21	27.6 ± 0.21	—	—
D 30 e_c 一定	2	—	—	14.54 ± 0.15	13.96 ± 0.15	—	13.58 ± 0.15	14.67 ± 0.15
	4	—	—	23.47 ± 0.15	21.93 ± 0.15	—	21.95 ± 0.15	22.05 ± 0.16
	6	—	—	31.02 ± 0.15	29.88 ± 0.15	—	30.25 ± 0.16	30.85 ± 0.15

(単位: kgf/cm²)

最大軸差応力の誤差は、D 10およびD 30でそれぞれ± 0.19 ~ ± 0.22 kgf/cm² および± 0.15 ~ ± 0.16 kgf/cm² である。以上は供試体作成時の誤差すなわち供試体初期直径および初期高さの誤差がない場合 ($\Delta D_0 = \Delta H_0 = 0$) である。 e_c 一定試験で最大粒径が 19.1 mm の場合について、供試体作成時の誤差が加わった時の最大軸差応力の誤差を同様に求めると表-21のようになる。供試体作成時の誤差がD 10で $\Delta D_0 = \Delta H_0 = 0.3$ mm およびD 30で 0.5 mm あったとしても、ない場合に比較して、その差はそれぞれ 0.01 ~ 0.10 kgf/cm² および 0.01 ~ 0.05 kgf/cm² である。したがって、試験誤差の検討を行う場合には、試験時の各測定誤差により生ずる誤差についてのみ考慮する。

表-21 最大軸差応力の誤差
(供試体作成時の誤差が加わった場合)

試 験 ケ ー ス	供 試 体 の 初 期 直 径 および初期高さの誤差 $\Delta D_0 = \Delta H_0$ (mm)	側 圧 (kgf/cm ²)		
		2	4	6
D 10 e_c 一定 $d_{max} = 19.1$ mm	0	13.8 ± 0.20	20.2 ± 0.20	27.5 ± 0.21
	± 0.1	± 0.20	± 0.21	± 0.23
	± 0.2	± 0.21	± 0.23	± 0.26
	± 0.3	± 0.22	± 0.26	± 0.31
D 30 e_c 一定 $d_{max} = 19.1$ mm	0	13.96 ± 0.15	21.93 ± 0.15	29.88 ± 0.15
	± 0.5	± 0.16	± 0.18	± 0.20

側圧と最大軸差応力との関係を最大粒径をパラメータとして図-34に示す。

最大軸差応力は側圧の増加とともに増加している。(図-34の③④⑤) 最大軸差応力を同一側圧で比較すると、D 10では最大粒径が 2.00 mm, 4.76 mm, 9.52 mm と大きくなると最大軸差応力は逆に減少するが、9.52 mm を境にして 19.1 mm, 25.4 mm と最大粒径が大きくなると

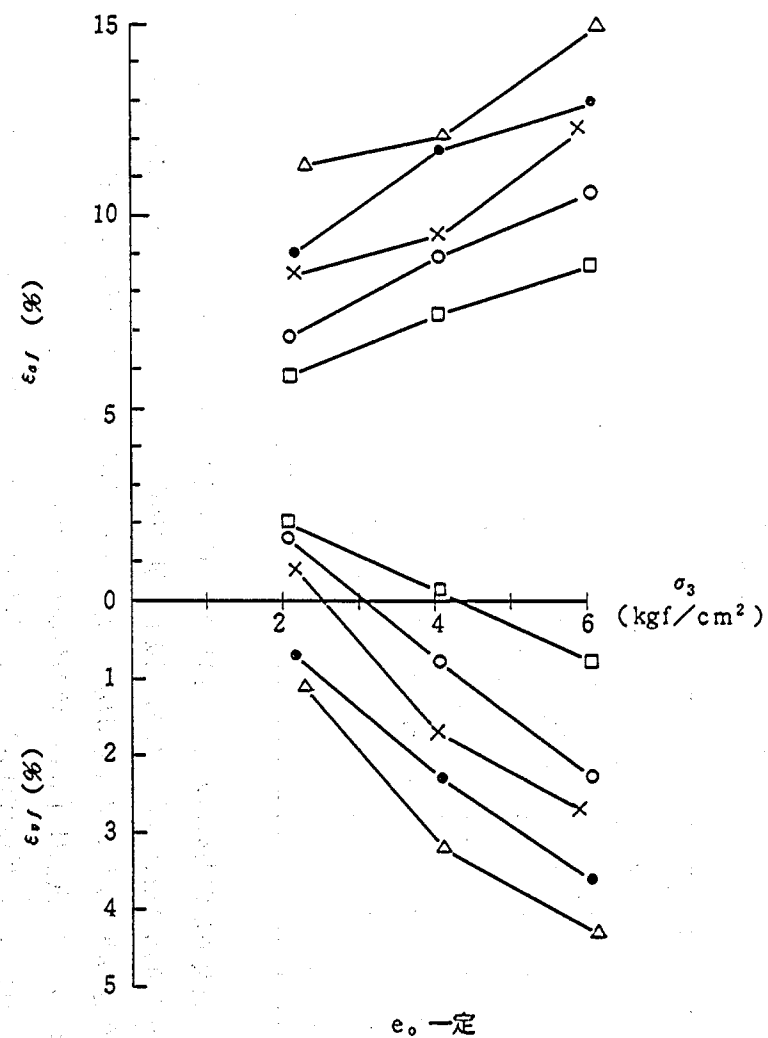
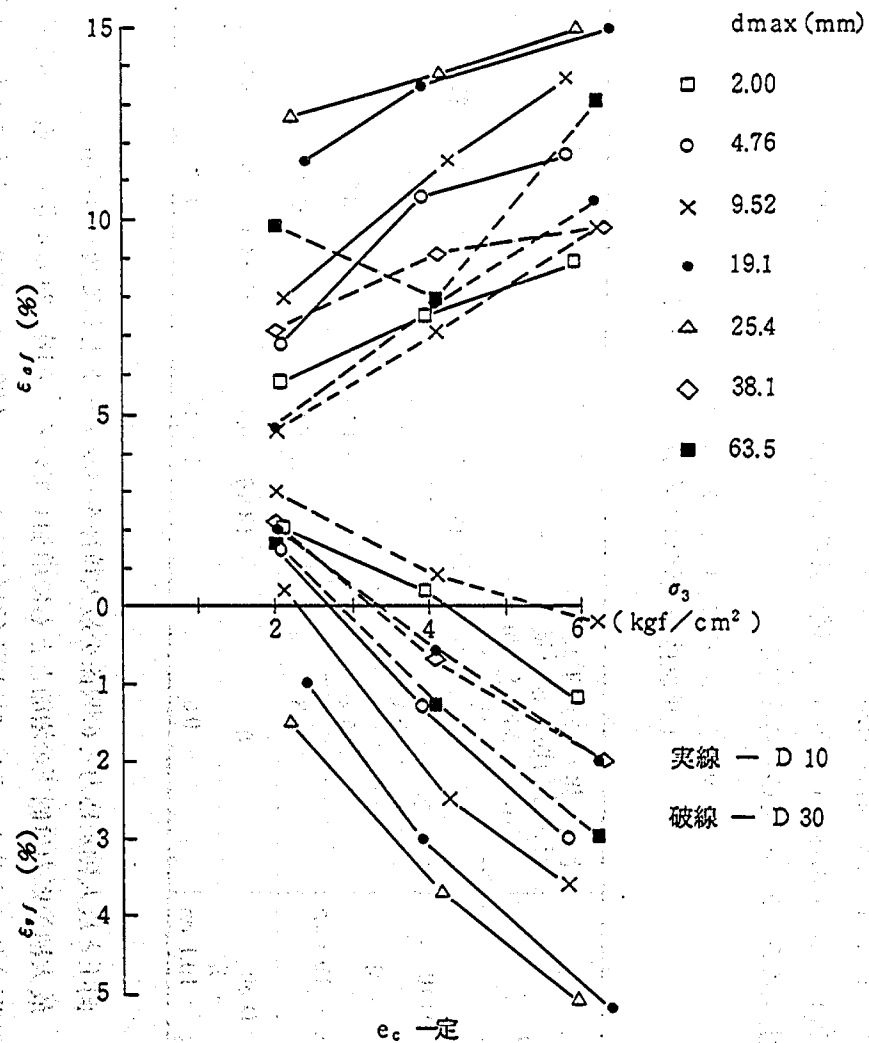
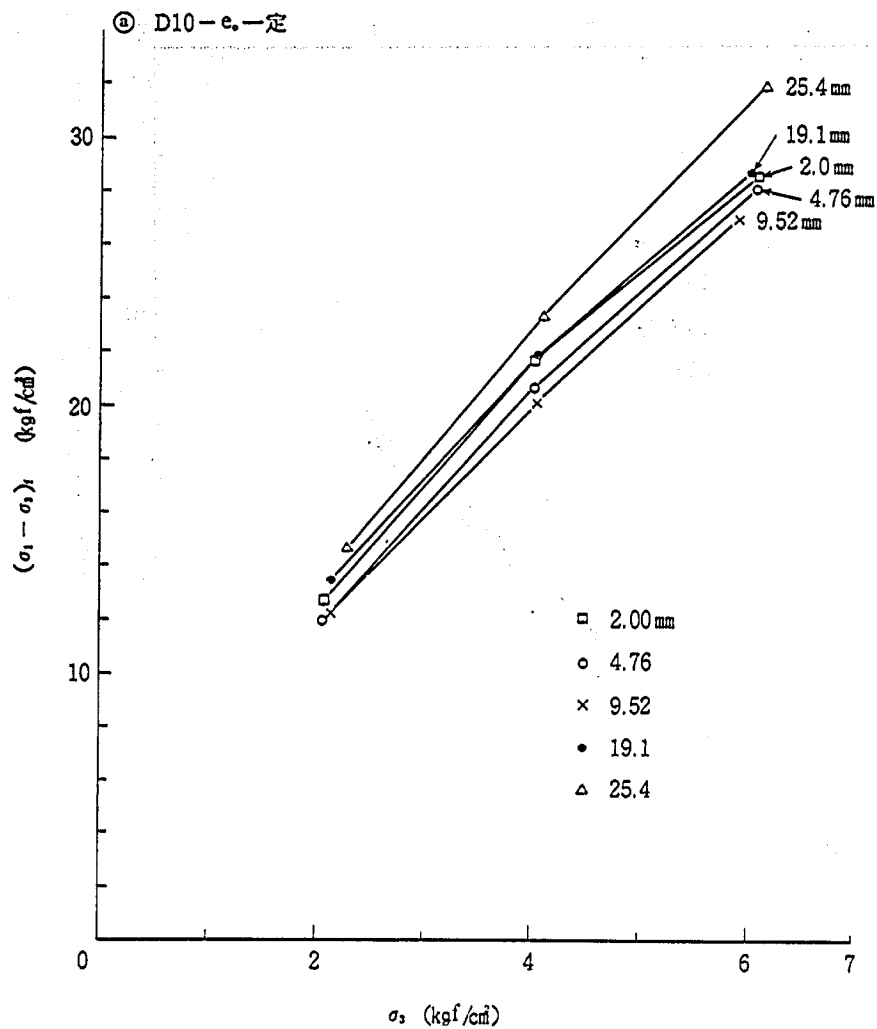


図-33 側圧と破壊時の軸ひずみおよび体積ひずみ

㊤ D10-e₀一定



㊦ D10-e_c一定

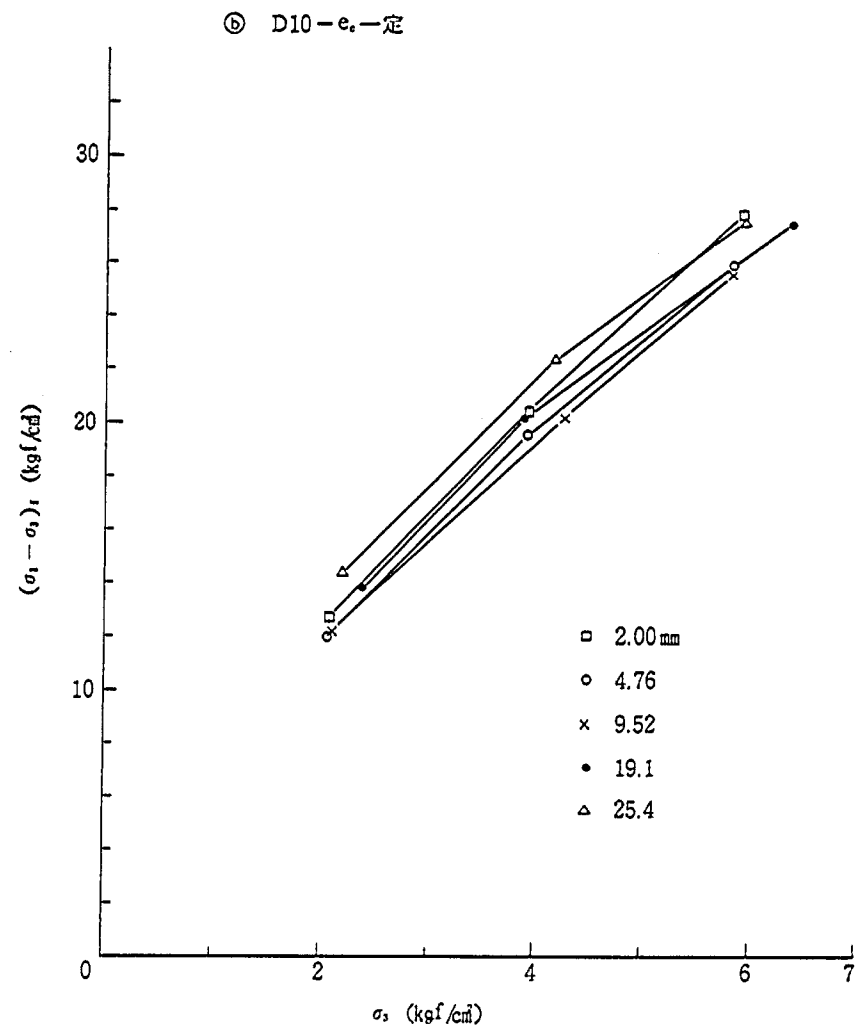


図-34 側圧と最大軸差応力

◎ D30- e_c 一定

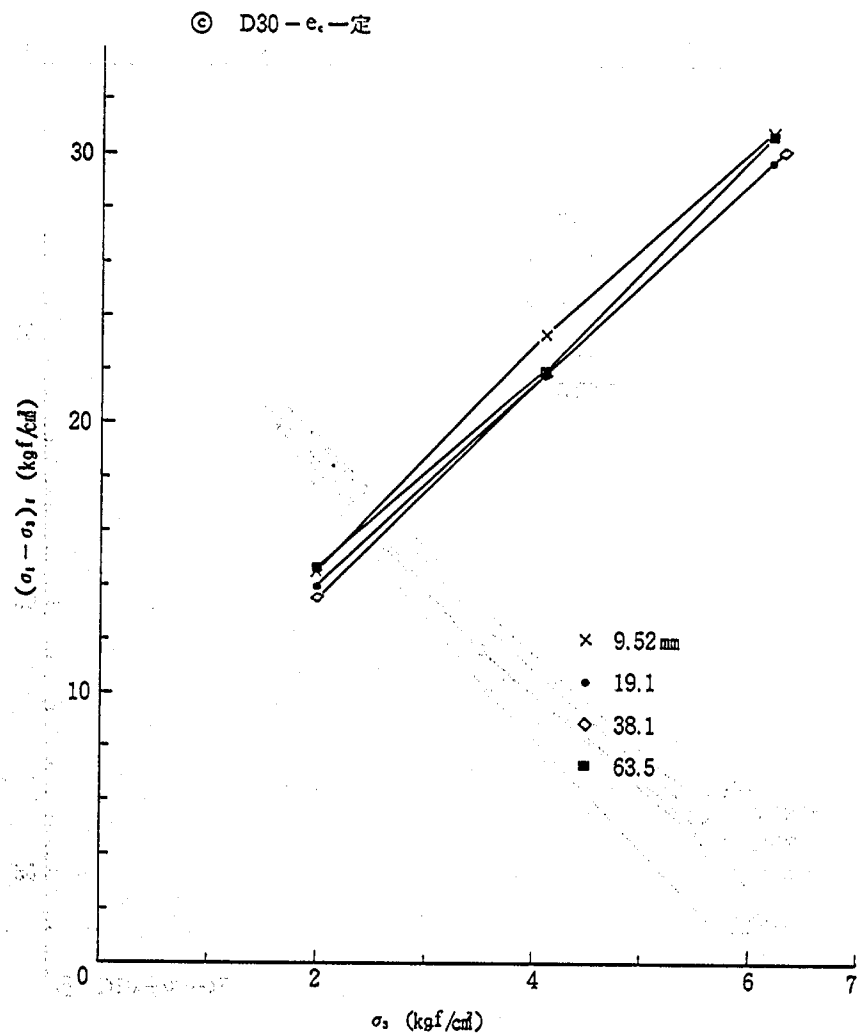
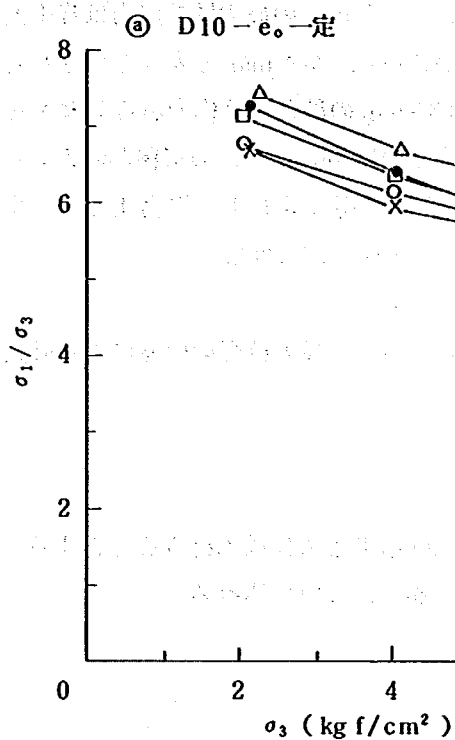
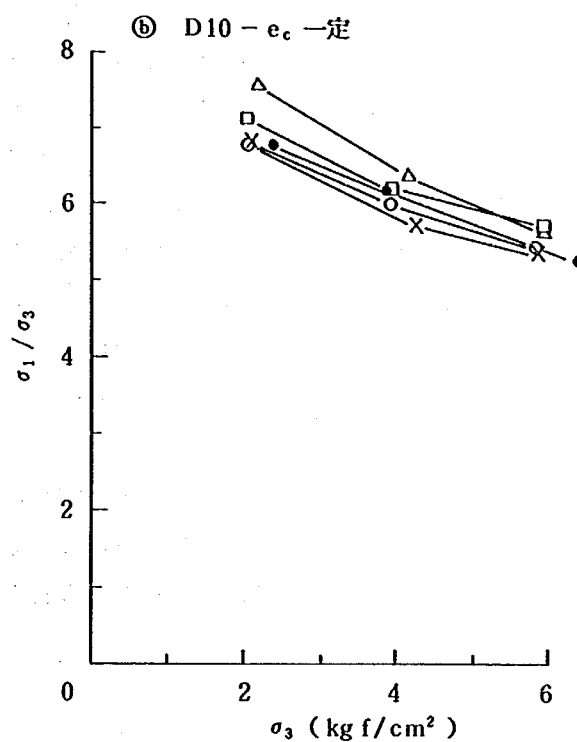


図-34 側圧と最大軸差応力

④ D10- e_o 一定



⑤ D10- e_c 一定



⑥ D30- e_c 一定

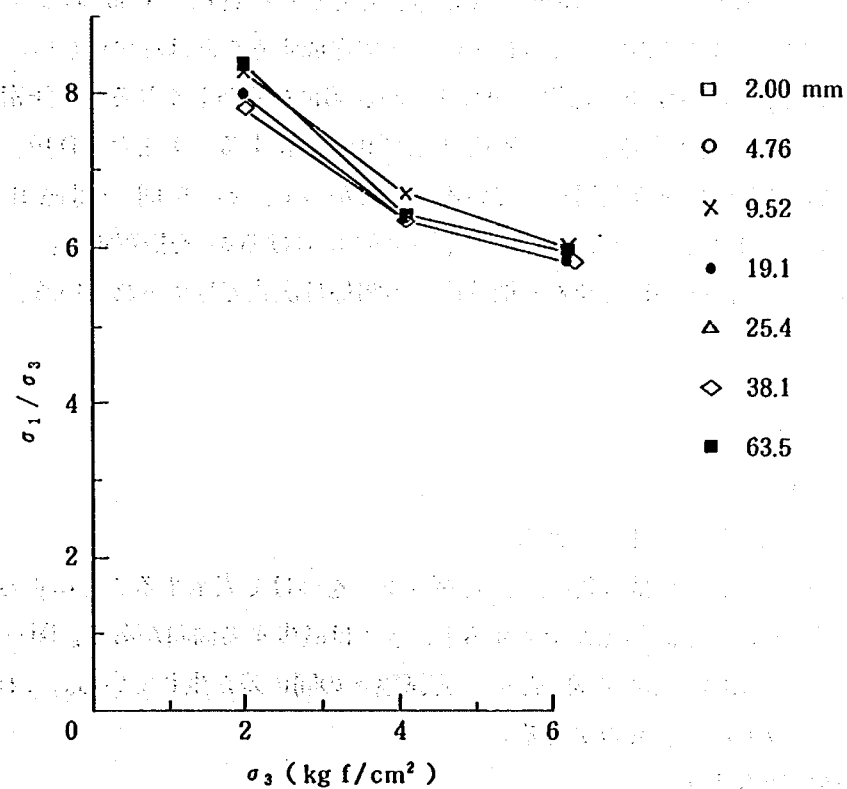


図-35 側圧と最大主応力比

もに最大軸差応力も増加する傾向がみられる。(図-34の④⑤) D30では、最大粒径が19.1 mmと38.1 mmの最大軸差応力はほぼ同じであるが、9.52 mmと63.5 mmの最大軸差応力は若干大きな値を示している。(図-34の⑥) D10で最大粒径が19.1 mm、25.4 mmと大きくなるとともに最大軸差応力が増加することおよびD30で最大粒径63.5 mmの最大軸差応力が若干大きな値を示すことの要因の一つとして、最大粒径と供試体寸法との比 $d_{\max}/D$ の影響が考えられる。なお、圧密後間隙比を一定に設定した方が、初期間隙比を一定にした場合よりも、最大粒径の相違による最大軸差応力の差が小さいようである。(図-34の④⑤)

側圧と最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ との関係を図-35に示す。

側圧の増加に伴い、最大主応力比は低下する傾向を示している。最大粒径の相違による最大主応力比は、最大軸差応力とはほぼ同様の傾向を示している。

3) せん断強さ

三軸圧縮試験結果をまとめて表-22から表-24に示す。

この項では、初期間隙比を一定にして実施したS56試験結果との比較も行うこととする。まず、 $C=0$ として次式より求められるせん断抵抗角 (ϕ_0) について述べる。

$$\phi_0 = \arcsin\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}\right)f$$

なお、 ϕ_0 と最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ との間には次の対応関係がある。

$$\phi_0 = \arcsin \frac{(\sigma_1/\sigma_3)_f - 1}{(\sigma_1/\sigma_3)_f + 1}$$

D10の e_0 一定および e_c 一定試験において、密度の設定値としてそれぞれ $e_0 = 0.56$ および $e_c = 0.53$ を採用したが、各供試体をこの値に完全に一致させて作成することはむずかしい。 e_c 一定試験では、供試体作成のみならず圧密過程も加わるためさらにむずかしくなる。(圧密過程において体積変化量が 10 cm^3 変化すると、間隙比はほぼ0.01変化する。)また、D10、D30、D50およびD120試験において密度が異なっている。したがって、 ϕ_0 を同一間隙比で比較するために、最上の式を用いて $e_0 = 0.56$ および $e_c = 0.53$ における ϕ_0 を推定する。

最上によれば、三軸試験の場合間隙比とせん断抵抗角との関係は次式で与えられている。¹⁷⁾

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

ϕ : せん断抵抗角

e : 間隙比

K_t : 三軸圧縮試験より求まる定数

以後、この式を用いて推定したせん断抵抗角を ϕ_0' とダッシュをつけて表示することにする。

側圧と ϕ_0' との関係を図-36に示す。側圧が増加すると、 ϕ_0' は減少する傾向がある。図-36の⑥において、D30の e_0 一定試験(S56試験)と e_c 一定試験との間に差が生じている。これらの試験の相違点としては、以下に示すものがある。

① 締固め方法(供試体作成方法)

② 真空ポンプによる供試体吸引の有無

③ せん断速度

④ 供試体端面処理の有無

ここで、③および④の相違については、前述したようにほとんど影響しないと思われるため①および②の相違により差が生じたものと考えられる。①については、 e_c 一定試験では振動テーブル、 e_c 一定試験では振動ランマーによる締固めである。D10、D50およびD120とも供試体上面を打撃または振動により締固めているため、 e_c 一定試験に似かよった締固め方法である。また、②についてはD30の e_c 一定試験のみ真空ポンプによる吸引を行っていない。したがって、以後の ϕ_o についての検討において、D30としては e_c 一定試験の結果を用いることとする。

密度の相違の他に、試験側圧においても若干のバラツキがあるため、各側圧間における ϕ_o' に直線関係が成り立つと仮定して、 $\sigma_3 = 2, 4$ および 6 kgf/cm^2 の ϕ_o' を求めた。

以上のように間隙比および側圧について補正した ϕ_o を ϕ_o' とダッシュを2個つけて表すこととし、 ϕ_o' と最大粒径との関係を図-37に示す。

$e_c = 0.53$ でのD10において、最大粒径が2.00 mm～4.76 mmの間は、最大粒径が大きくなると ϕ_o' は小さくなり、9.52 mm～25.4 mmの間は、最大粒径が大きくなると ϕ_o' も大きくなる傾向を示している。また、最大粒径が9.52 mmではD10とD30の ϕ_o' はほぼ等しいが、最大粒径が19.1 mmではD10はD30より大きな ϕ_o' となっている。後者の傾向については、最大粒径が19.1 mmおよび25.4 mmの $d_{\max}/D$ はそれぞれ1/5.2 および 1/3.9 であるため、供試体寸法の影響があらわれているものと思われる。また、D30の63.5 mm、D50の101.6 mm および D120の250 mmについても $d_{\max}/D$ がそれぞれ1/4.7, 1/4.9 および 1/4.8 であるため同様のことがいえよう。供試体寸法の影響を考慮すると、最大粒径が2.00 mmから250 mmまでに關しては、最大粒径が大きくなると ϕ_o' は小さくなる傾向がある。

$e_c = 0.56$ での ϕ_o' は、同一粒径でも試験機が異なると若干差があるが $e_c = 0.53$ での ϕ_o' とほぼ同様の傾向を示している。

表-22 三軸圧縮試験結果一覧表 (D10 - e_o 一定)

試 度	ケース名	比重 $\bar{G}_b$ 含水率 $\bar{Q}$ (%)	側圧 σ_3 (kgf/cm ²)	初期乾 縮密度 γ_d (g/cm ³)	間 隙 比				破 壊 時								E_{30} (kgf/cm ²)	三軸減 破砕率 (%)	強度定数	
					初期 e_o	圧密後 e_c	破壊時 e_f	e_c/e_o	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kgf/cm ²)	σ_f (%)	$(\Delta V/V_c)_f$ (%)	$(\sigma_1/\sigma_3)_f$	ϕ_o (度)	割断変 形係数 (kgf/cm ²)					せん断 抵抗角 ϕ (度)	粘着力 c (kgf/cm ²)
A	D10- e_c 一定 $d_{\max} = 2.00 \text{ mm}$	$\bar{G}_b = 2.964$	2.08	1.889	0.569	0.543	0.559	0.954	12.73	5.8	-1.0	7.12	48.9	219	749	3.5	42.1	103		
			4.03	1.885	0.572	0.538	0.539	0.941	21.66	7.4	-0.1	6.31	46.8	293	1231	5.3				
			6.03	1.888	0.570	0.527	0.514	0.925	28.77	8.7	0.8	5.77	44.8	331	1252	6.1				
B	$d_{\max} = 4.76 \text{ mm}$	$\bar{G}_b = 2.952$	2.07	1.887	0.564	0.534	0.547	0.947	11.94	6.8	-0.8	6.77	48.0	176	841	4.4	42.0	0.86		
			4.03	1.892	0.560	0.511	0.499	0.913	20.63	8.9	0.8	6.12	46.0	232	921	5.2				
			6.07	1.891	0.561	0.496	0.462	0.884	28.10	10.6	2.3	5.63	44.3	265	943	6.2				
C	$d_{\max} = 9.52 \text{ mm}$	$\bar{G}_b = 2.920$ $\bar{Q} = 0.41$	2.15	1.873	0.559	0.521	0.527	0.932	12.26	8.5	-0.4	6.70	47.8	144	607	3.6	41.5	0.89		
			4.04	1.875	0.567	0.504	0.479	0.905	20.09	9.5	1.7	5.97	45.5	211	779	5.4				
			5.90	1.871	0.561	0.491	0.451	0.875	26.93	12.3	2.7	5.57	44.1	219	788	5.6				
D	$d_{\max} = 19.1 \text{ mm}$	$\bar{G}_b = 2.950$ $\bar{Q} = 0.45$	2.15	1.891	0.560	0.504	0.492	0.900	13.5	9.0	0.7	7.28	49.3	150	523	3.5	41.1	1.28		
			4.06	1.890	0.561	0.482	0.448	0.859	21.9	11.7	2.3	6.39	46.9	187	633	5.8				
			6.08	1.897	0.555	0.467	0.412	0.841	28.6	13.0	3.6	5.70	44.6	220	656	6.7				
E	$d_{\max} = 25.4 \text{ mm}$	$\bar{G}_b = 2.947$ $\bar{Q} = 0.44$	2.29	1.886	0.562	0.500	0.483	0.890	14.7	11.3	1.1	7.42	49.7	130	438	4.2	43.7	0.99		
			4.11	1.884	0.564	0.482	0.436	0.855	23.3	12.1	3.2	6.67	47.7	193	504	5.7				
			6.16	1.886	0.562	0.462	0.399	0.822	32.0	15.0	4.3	6.19	46.2	213	546	6.9				

表-23 三軸圧縮試験結果一覧表 (D10- e_c 一定)

粒 度	ケース名	比重 $\bar{G}_b$ 吸水率 $\bar{Q}$ (%)	側圧 σ_3 (kgf/cd)	初期乾 機密度 γ_d (g/cc)	間 隙 比				破 壊 時						E_{si} (kgf/cd)	三軸試 験時率 (%)	強度定数	
					初期 e_s	圧密後 e_c	破壊時 e_f	e_s/e_c	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kgf/cd)	e_f (%)	$(\Delta V/V_c)_f$ (%)	$(\sigma_1/\sigma_3)_f$	ϕ_0 (度)	割線変 形係数 (kgf/cd)			せん断 抵抗角 ϕ (度)	粘着力 成分 C (kgf/cd)
A	D10- e_c 一定 $d_{max}=2.00$ mm	$\bar{G}_b=2.964$	2.08	1.839	0.569	0.543	0.559	0.954	12.73	5.8	-1.0	7.12	43.9	219	749	3.5	41.5	1.06
			3.91	1.881	0.576	0.542	0.545	0.941	20.47	7.5	-0.2	6.20	46.2	273	1034	4.9		
			5.92	1.871	0.584	0.530	0.514	0.913	27.34	8.9	1.2	5.70	44.6	313	1070	5.7		
B	$d_{max}=4.76$ mm	$\bar{G}_b=2.962$	2.07	1.887	0.564	0.534	0.547	0.947	11.94	6.8	-0.8	6.77	43.0	176	841	4.4	40.6	1.03
			3.92	1.875	0.574	0.527	0.508	0.913	19.59	10.8	1.2	6.00	45.6	181	657	4.7		
			5.83	1.859	0.583	0.526	0.480	0.895	25.94	11.7	3.0	5.45	43.6	222	683	5.6		
C	$d_{max}=9.52$ mm	$\bar{G}_b=2.920$ $\bar{Q}=0.41$	2.10	1.863	0.567	0.529	0.532	0.933	12.21	8.0	-0.2	6.81	43.1	153	604	3.5	40.0	1.11
			4.26	1.838	0.589	0.528	0.489	0.896	20.25	11.6	2.5	5.75	44.7	175	614	5.0		
			5.83	1.826	0.599	0.521	0.466	0.870	25.57	13.7	3.6	5.39	43.4	187	656	6.4		
D	$d_{max}=19.1$ mm	$\bar{G}_b=2.930$ $\bar{Q}=0.45$	2.39	1.860	0.586	0.531	0.516	0.906	13.8	11.5	1.0	6.77	43.0	120	411	4.4	38.9	1.50
			3.89	1.846	0.593	0.527	0.481	0.881	20.2	13.5	3.0	6.19	45.2	150	451	6.2		
			6.39	1.807	0.632	0.532	0.453	0.842	27.5	15.0	5.2	5.30	43.1	183	541	9.1		
E	$d_{max}=25.4$ mm	$\bar{G}_b=2.947$ $\bar{Q}=0.44$	2.20	1.852	0.591	0.531	0.507	0.898	14.4	12.7	1.5	7.55	50.0	113	290	6.6	39.7	1.63
			4.17	1.819	0.621	0.530	0.474	0.853	22.4	13.8	3.7	6.37	45.8	162	407	5.9		
			5.94	1.803	0.634	0.520	0.442	0.820	27.6	15.0	5.1	5.65	44.4	134	455	9.6		

表-24 三軸圧縮試験結果一覧表 (D30- e_c 一定)

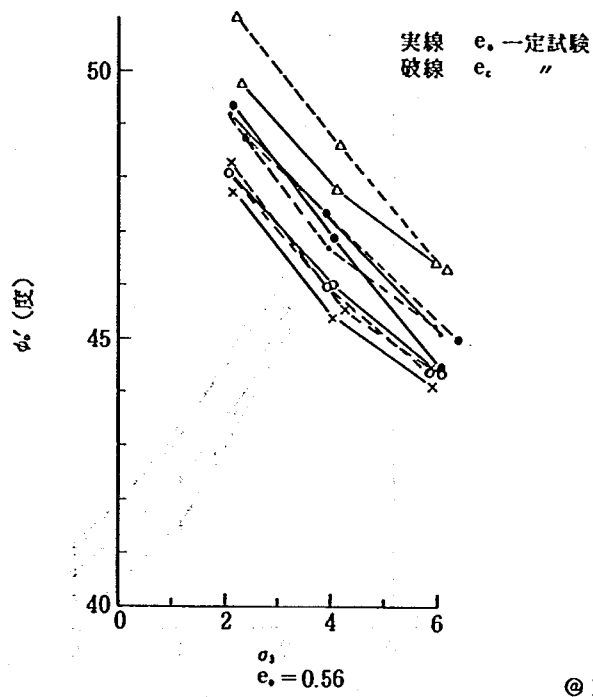
粒 度	ケース名	比重 $\bar{G}_b$ 吸水率 $\bar{Q}$ (%)	側圧 σ_3 (kgf/cd)	初期乾 機密度 γ_d (g/cc)	間 隙 比				破 壊 時						E_{si} (kgf/cd)	三軸試 験時率 (%)	強度定数	
					初期 e_s	圧密後 e_c	破壊時 e_f	e_s/e_c	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kgf/cd)	e_f (%)	$(\Delta V/V_c)_f$ (%)	$(\sigma_1/\sigma_3)_f$	ϕ_0 (度)	割線変 形係数 (kgf/cd)			せん断 抵抗角 ϕ (度)	粘着力 成分 C (kgf/cd)
C	D30- e_c 一定 $d_{max}=9.52$ mm	$\bar{G}_b=3.015$ $\bar{Q}=1.15$	2.0	2.066	0.459	0.436	0.457	0.950	14.54	4.5	-1.5	8.27	51.7	323	1218	4.0	41.5	1.56
			4.1	2.055	0.467	0.434	0.439	0.929	23.47	7.2	-0.4	6.72	47.8	326	1924	4.3		
			6.2	2.041	0.477	0.435	0.417	0.910	31.02	9.8	0.2	6.00	45.6	317	1373	6.8		
D	$d_{max}=19.1$ mm	$\bar{G}_b=3.015$ $\bar{Q}=0.90$	2.0	2.055	0.467	0.436	0.450	0.934	13.95	4.6	-1.0	7.98	51.0	303	1396	3.5	40.9	1.46
			4.1	2.038	0.479	0.434	0.426	0.906	21.93	7.8	0.6	6.35	46.7	281	1462	5.4		
			6.2	2.029	0.486	0.435	0.406	0.895	29.88	10.5	2.0	5.82	45.0	285	1107	6.7		
F	$d_{max}=38.1$ mm	$\bar{G}_b=3.015$ $\bar{Q}=0.68$	2.0	2.050	0.471	0.434	0.450	0.921	13.58	7.1	-1.1	7.79	50.6	191	1132	6.2	41.3	1.34
			4.1	2.032	0.484	0.436	0.426	0.901	21.95	9.1	0.7	6.35	46.7	241	1276	7.6		
			6.3	2.015	0.496	0.434	0.406	0.875	30.25	9.8	2.0	5.80	44.9	309	1153	7.1		
G	$d_{max}=63.5$ mm	$\bar{G}_b=3.015$ $\bar{Q}=0.55$	2.0	2.039	0.479	0.432	0.458	0.902	14.67	9.8	-0.8	8.34	51.8	150	917		41.2	1.53
			4.1	2.019	0.493	0.436	0.417	0.884	22.05	7.9	1.3	6.38	46.8	279	976	7.6		
			6.2	1.983	0.517	0.432	0.389	0.836	30.85	13.1	3.0	5.98	45.5	235	834			

ϕ_0 の試験誤差を側圧および最大軸差応力の誤差から求めて表-25に示す。

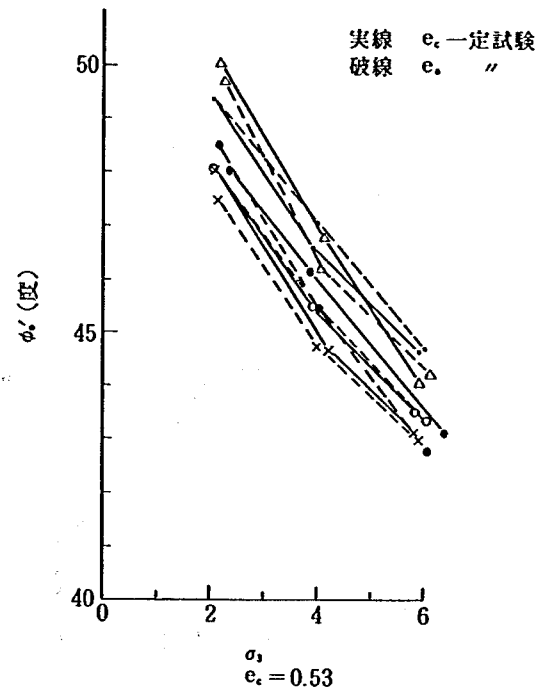
表-25 ϕ_0 の 誤 差

	側 圧 σ_3 (kgf/cd)	最 大 粒 径 d_{max} (mm)						
		2.00	4.76	9.52	19.1	25.4	38.1	63.5
D 10 e_c 一定	2	48.9 $\pm$ 0.4	48.0 $\pm$ 0.4	47.8 $\pm$ 0.4	49.3 $\pm$ 0.4	49.7 $\pm$ 0.4	—	—
	4	46.8 $\pm$ 0.2	46.0 $\pm$ 0.3	45.5 $\pm$ 0.3	46.9 $\pm$ 0.3	47.7 $\pm$ 0.2	—	—
	6	44.8 $\pm$ 0.2	44.3 $\pm$ 0.2	44.1 $\pm$ 0.2	44.6 $\pm$ 0.2	46.2 $\pm$ 0.2	—	—
D 10 e_c 一定	2	—	—	48.1 $\pm$ 0.4	48.0 $\pm$ 0.4	50.0 $\pm$ 0.4	—	—
	4	46.2 $\pm$ 0.3	45.6 $\pm$ 0.3	44.7 $\pm$ 0.3	46.2 $\pm$ 0.3	46.8 $\pm$ 0.2	—	—
	6	44.6 $\pm$ 0.2	43.6 $\pm$ 0.2	43.4 $\pm$ 0.2	43.1 $\pm$ 0.2	44.4 $\pm$ 0.2	—	—
D 30 e_c 一定	2	—	—	51.7 $\pm$ 0.6	51.0 $\pm$ 0.6	—	50.6 $\pm$ 0.6	51.8 $\pm$ 0.6
	4	—	—	47.8 $\pm$ 0.3	46.7 $\pm$ 0.3	—	46.7 $\pm$ 0.3	46.8 $\pm$ 0.3
	6	—	—	45.6 $\pm$ 0.2	45.0 $\pm$ 0.2	—	44.9 $\pm$ 0.2	45.5 $\pm$ 0.2

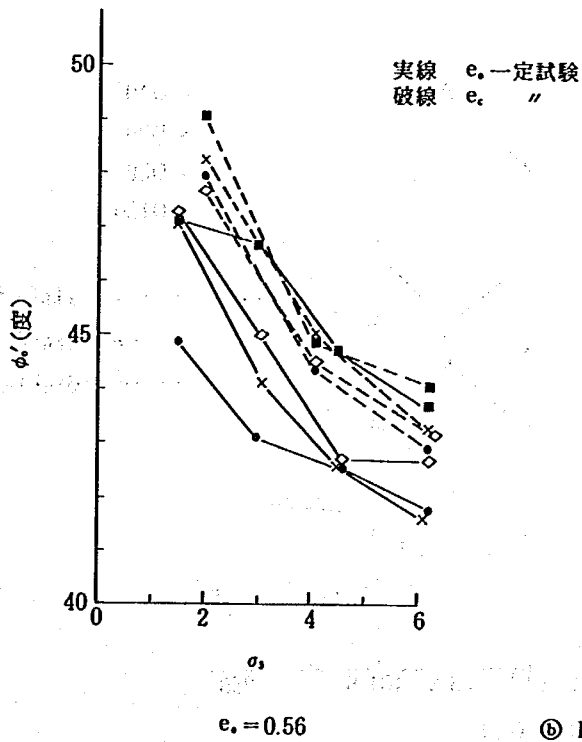
④ D10



④ D10



⑤ D30



⑤ D30

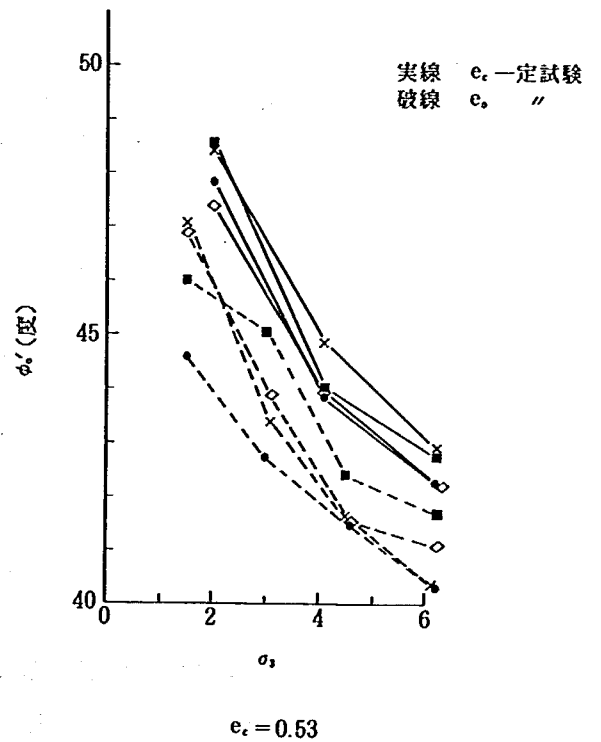


図-36 側圧と推定せん断抵抗角 (ϕ'_0)

© D 50, D 120
(実線) (破線)

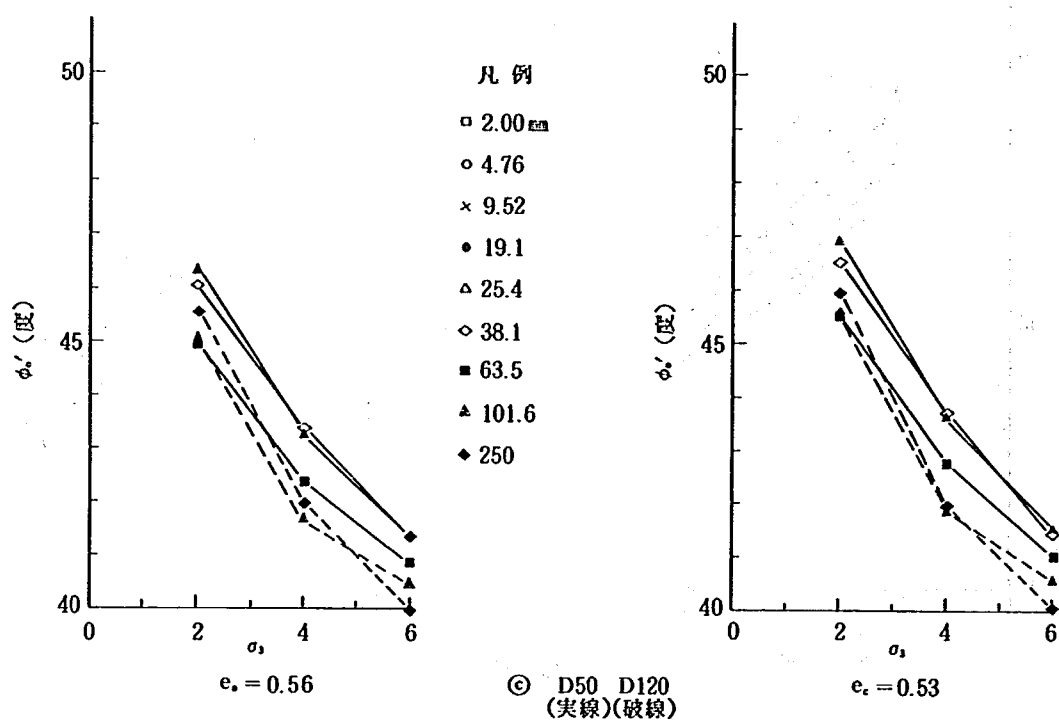


図-36 側圧と推定せん断抵抗角 (ϕ_0')

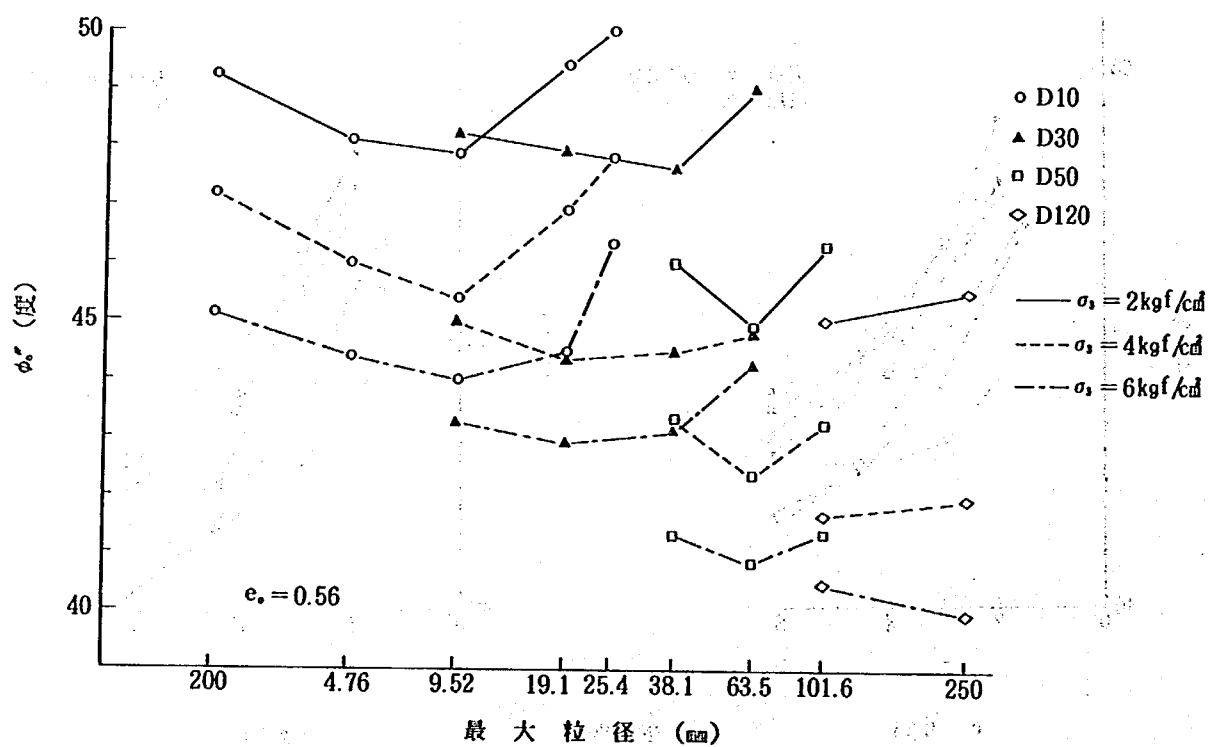


図-37(1) 最大粒径と ϕ_0'

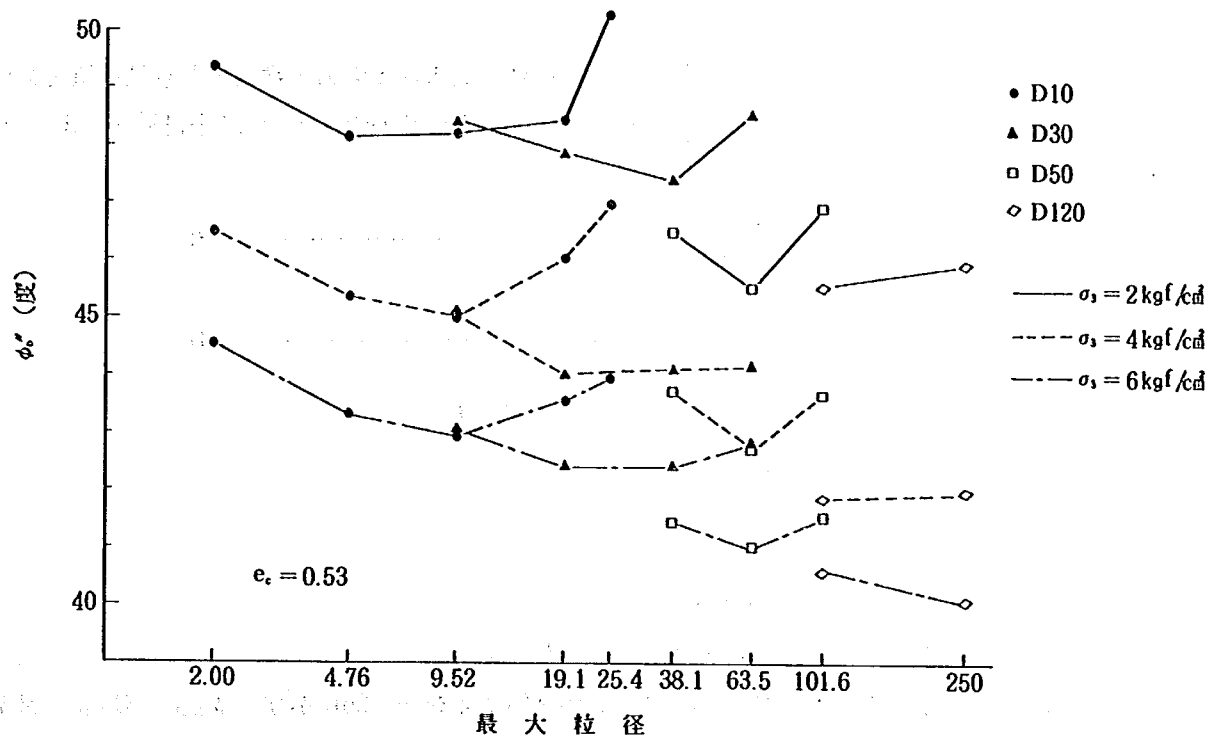


図-37(2) 最大粒径と ϕ_0

次に、ロックフィルダムの設計値として一般に用いられているモール・クーロンの破壊規準による強度定数であるせん断抵抗角および粘着力成分について述べる。

強度定数は側圧と最大軸差応力との関係より求めた値である。

以下に求め方を示す。¹⁸⁾

図-38のモールの応力円と、応力円に接する包絡線の関係から

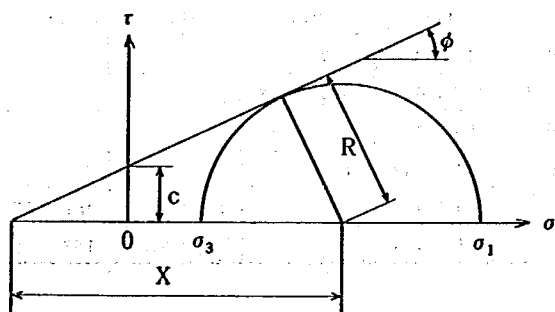


図-38 モールの応力円

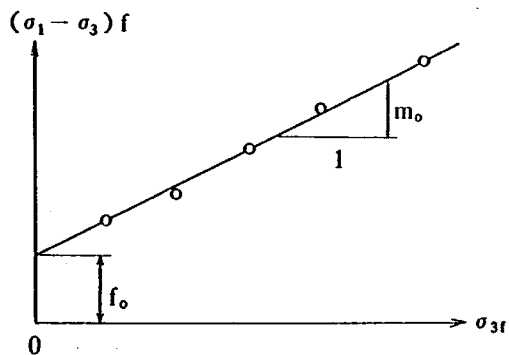


図-39 $\sigma_3 f$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)f$ のプロット

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

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

となる。そこで、図-39のように試験側圧を横軸に最大軸差応力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

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

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

と表わすことができる。したがって、(3)および(4)式より

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

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

となりせん断抵抗角 (ϕ)、粘着力成分 (C) が求まる。

上記の方法で求めた強度定数 ϕ_{cd} 、 C_{cd} の試験誤差を表-26に示す。 ϕ_{cd} 、 C_{cd} の誤差は次のように求める。各側圧段階における試験値の誤差範囲をすでに求めた σ_3 および $(\sigma_1 - \sigma_3)f$ の誤差より求める。各試験値の誤差範囲における四角の4点を組合せて ($4 \times 4 \times 4 = 64$ 通り)、 ϕ_{cd} 、 C_{cd} の最大値および最小値を求め、 ϕ_{cd} 、 C_{cd} の試験誤差とする。 ϕ_{cd} 、 C_{cd} の試験誤差は、D10およびD30でそれぞれ ± 0.6 度、 $\pm 0.17 \text{ kgf/cm}^2$ 程度および ± 0.7 度、 $\pm 0.20 \text{ kgf/cm}^2$ 程度である。

表-26 ϕ_{cd} 、 C_{cd} の 誤 差

		最 大 粒 径 $d_{max} \text{ (mm)}$						
		2.00	4.76	9.52	19.1	25.4	38.1	63.5
D10 e_c 一定	$\phi_{cd} \text{ (度)}$	42.1 ± 0.6	42.0 ± 0.6	41.5 ± 0.7	41.1 ± 0.7	43.7 ± 0.6	—	—
	$C_{cd} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	1.03 ± 0.17	0.86 ± 0.16	0.89 ± 0.17	1.28 ± 0.18	0.99 ± 0.18	—	—
D10 e_c 一定	$\phi_{cd} \text{ (度)}$	41.5 ± 0.6	40.6 ± 0.7	40.0 ± 0.7	38.9 ± 0.7	39.7 ± 0.7	—	—
	$C_{cd} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	1.06 ± 0.17	1.03 ± 0.17	1.11 ± 0.17	1.50 ± 0.19	1.63 ± 0.18	—	—
D30 e_c 一定	$\phi_{cd} \text{ (度)}$	—	—	41.5 ± 0.7	40.9 ± 0.7	—	41.3 ± 0.7	41.2 ± 0.7
	$C_{cd} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	—	—	1.56 ± 0.21	1.46 ± 0.20	—	1.34 ± 0.20	1.53 ± 0.20

初期間隙比 e_c を一定にした試験結果をD30、D50およびD120 (S. 56試験) の試験結果とともに図-40に示す。なお、D10とD30、D50およびD120 とでは e_c が異なるため、最上の式により $e_c = 0.56$ での推定せん断抵抗角により比較している。

D10については、最大粒径が2.00 mm～19.1 mmと大きくなるに従い、 ϕ_{cd} は減少する傾向を示しているが、25.4 mmになると急に大きくなっている。これは供試体寸法の影響によるものと思われる。

D30については、最大粒径が9.52 mmを除いて19.1 mm、38.1 mm および63.5 mmではほぼ一定の値を示している。D50においても、最大粒径が38.1 mm、63.5 mm および101.6 mm ではほぼ同一の値を示している。D120については、2点しかないが最大粒径が101.6 mm および250 mmではほぼ同じ値を示している。

全体としてみた場合、試験機ごとの値に差があり、試験機が大きくなると階段状に ϕ_{cd} の値が低下する傾向を示している。

圧密後間隙比 e_c を一定にした試験結果を図-41に示す。ここでも、最上の式により $e_c = 0.53$ での推定せん断抵抗角により比較している。

図-41の中に示してあるD50とD120の値は、初期間隙比を統一して試験した結果から最上の式より各側圧での圧密後間隙比と最大主応力差から $e_c = 0.53$ での最大主応力差の推定値を基に ϕ_{cd} を求めた参考値である。

最大粒径が9.52 mmおよび19.1 mmでのD10とD30との ϕ_{cd} の値は、 e_c 一定試験の場合に較べてほとんど差がない。最大粒径が19.1 mmまでは、最大粒径が大きくなると ϕ_{cd} は低下するが、19.1 mm以上ではほぼ同じ値を示している。なお、最大粒径が19.1 mmにおける細粒分（-4.76 mm以下）の含有率は30%程度である。

D10の最大粒径25.4 mmについては、供試体寸法の影響があらわれているが、D10の19.1 mmおよびD30の63.5 mmについては ϕ_c でみられたように、明確には供試体寸法による影響があらわれていない。

なお、側圧と破碎率との関係を図-42に示す。破碎率と $(\sigma_1 - \sigma_3)f$ 、 σ_1/σ_3 および ϕ_c との関係をそれぞれ図-43～図-45に示す。

破碎率は側圧の増加とともに増加する傾向を示している。破碎率の増加に伴って、 $(\sigma_1 - \sigma_3)f$ は増加し、 σ_1/σ_3 および ϕ_c は減少する傾向がある。

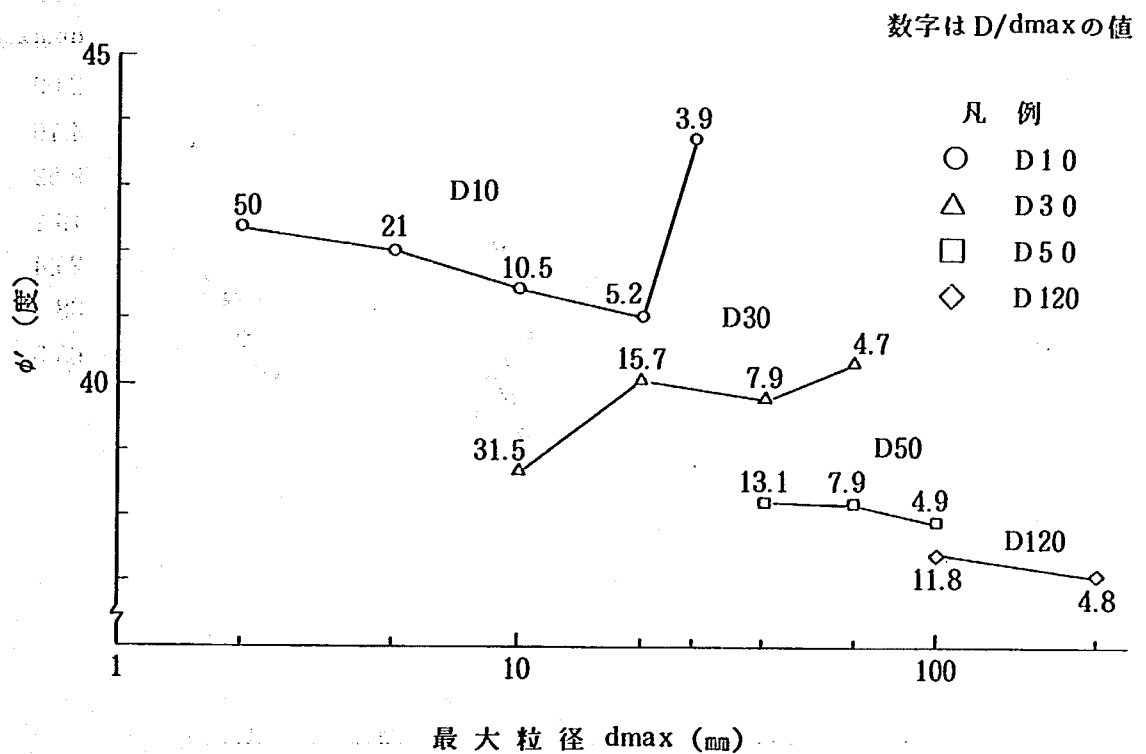


図-40 最大粒径と $e_c = 0.56$ での推定せん断抵抗角

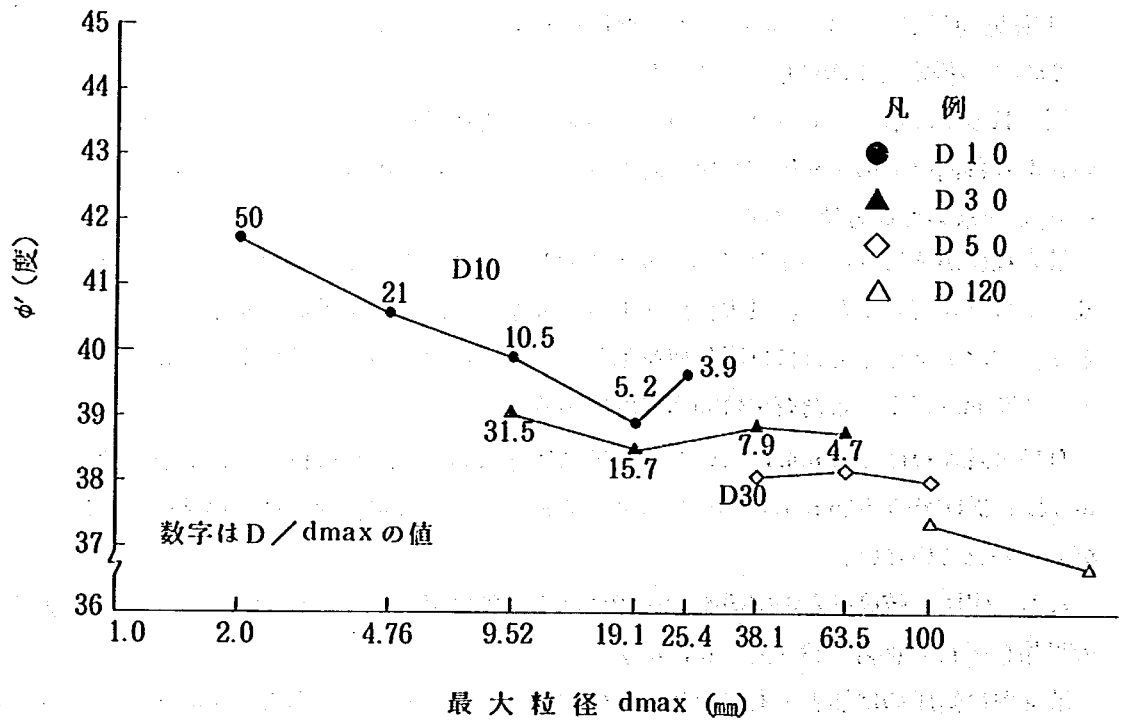


図-41 最大粒径と $e_c = 0.53$ での推定せん断抵抗角

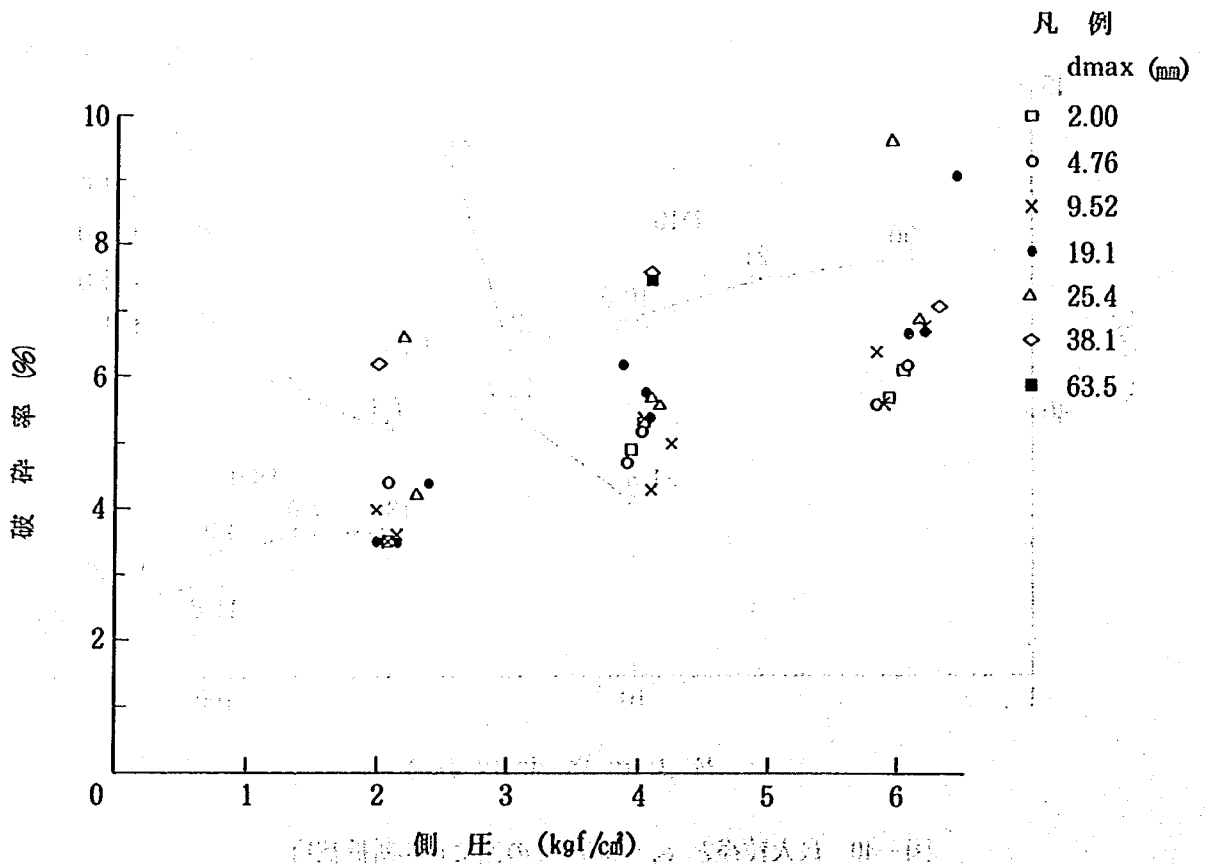


図-42 側圧と破碎率

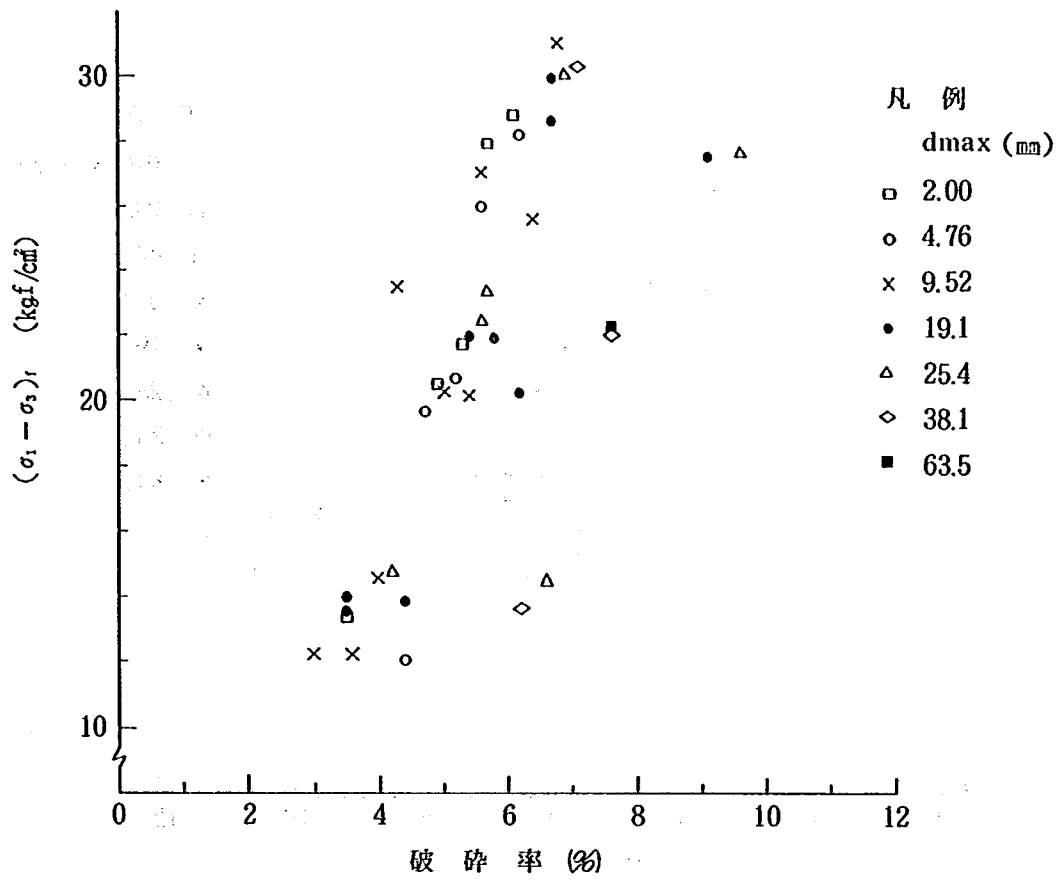


図-43 破碎率と最大軸差応力

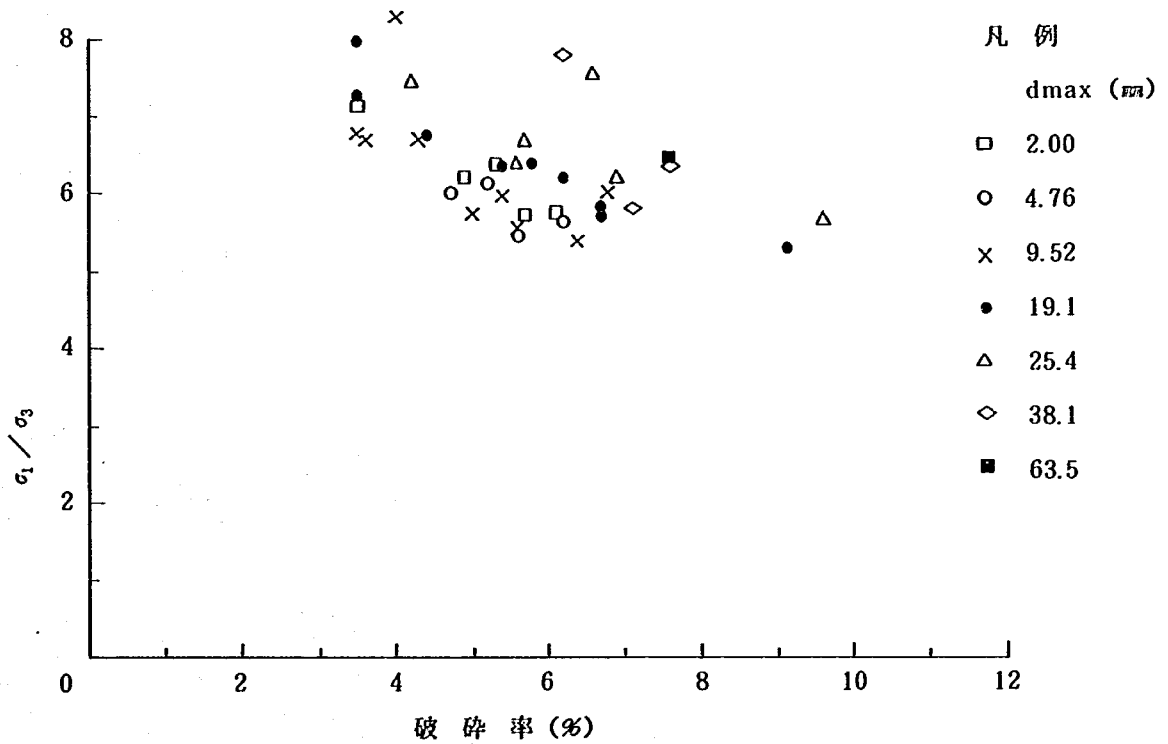


図-44 破碎率と最大主応力比

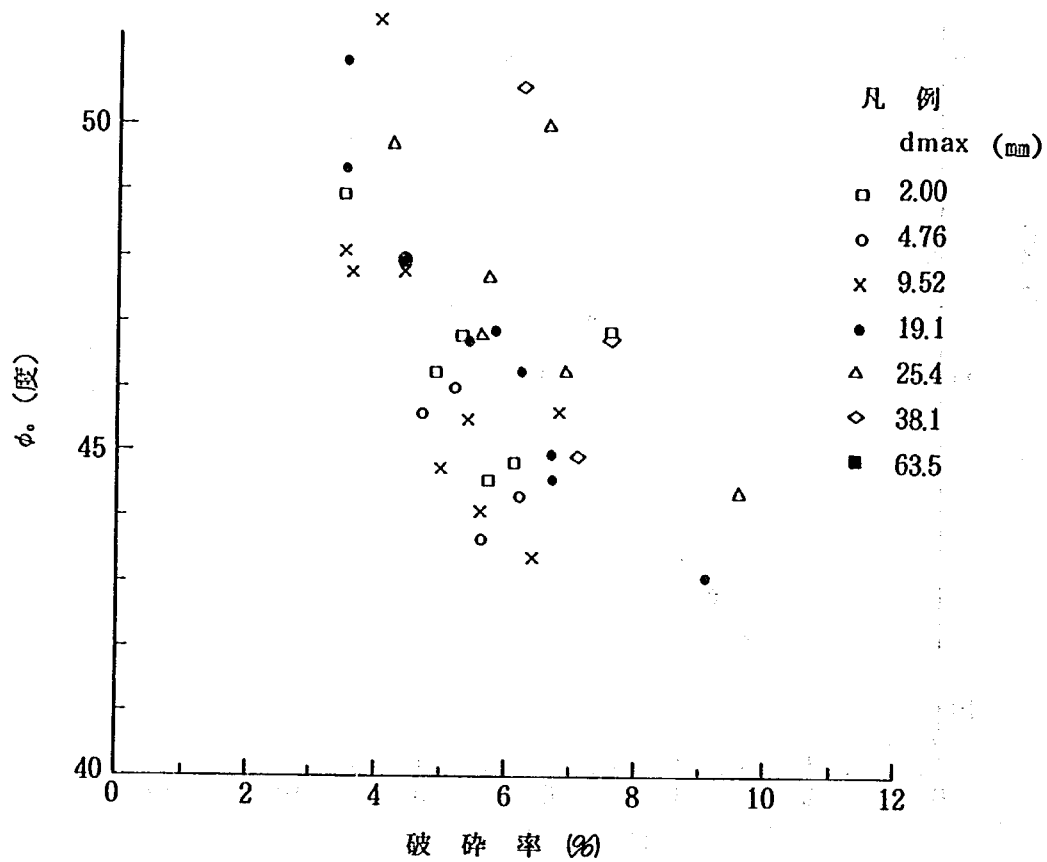


図-45 破碎率と $C=0$ として求めたせん断抵抗角 (ϕ_0)

4. 結 論

S.56試験に引続いて実施した最大粒径を変化させた相似粒度ロック材料の三軸圧縮比較試験の結論は下記のとおりである。

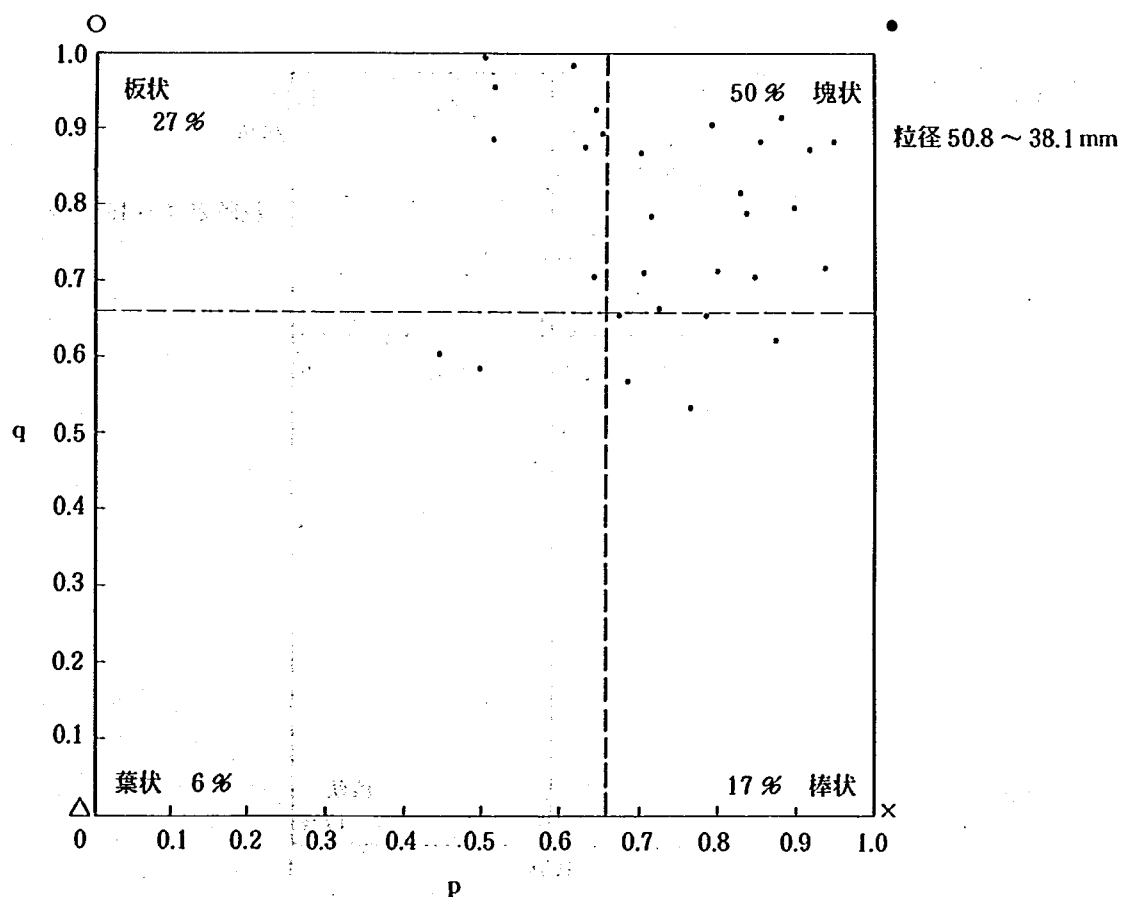
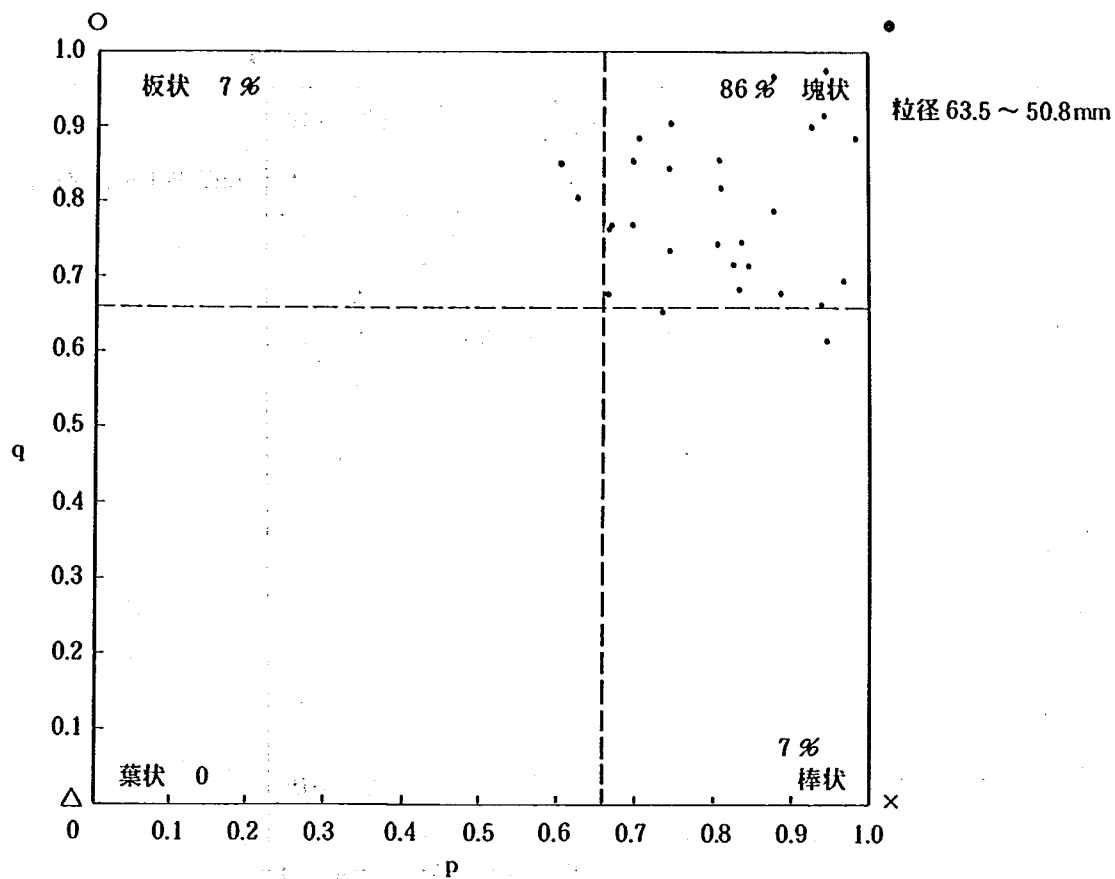
- (1) 最大粒径が供試体直径の $\frac{1}{2}$ 程度以上になるとせん断抵抗角 ϕ_{cd} は大きくなる傾向がある。
 - (2) 細粒分 (4.76mm以下のもの) の含有率が30%程度以上になるとせん断抵抗角 ϕ_{cd} は大きくなる傾向がある。
 - (3) 供試体初期密度を一定にした試験 (e_0 一定試験) では、試験機が大きくなると階段状にせん断抵抗角 ϕ_{cd} が低下する傾向がある。
 - (4) 圧密後の供試体密度を一定にした試験 (e_c 一定試験) では、相似粒度、最大粒径が供試体直径の $\frac{1}{2}$ 以下および細粒分 (4.76 mm 以下のもの) の含有率が30%程度以下である条件を満足すれば、供試体の大きさ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抵抗角 ϕ_{cd} を求めることができるものと考えられる。
- しかし、圧密後の供試体密度は①試験機 (供試体) の大きさ②供試体作成方法 (締固め方法) ③ゴム膜貫入量 (真空ポンプによるメンブレン吸引の有無等) ④測定精度によって異なるため同一密度の設定方法について検討が必要である。
- (5) 本比較試験で大きく異なる点は供試体の作成方法である。したがって、粒子破碎を考慮した供試体作成方法の統一及び同一締固め方法による最大粒径の相違が締固め密度に与える影響について検討する必要がある。
 - (6) せん断抵抗角に対するせん断速度 (0.25 ~ 2.00 %/min) および供試体の上下面を平滑にするための細粒分による端面処理の影響はほとんどないものと考えられる。

< 参 考 文 献 >

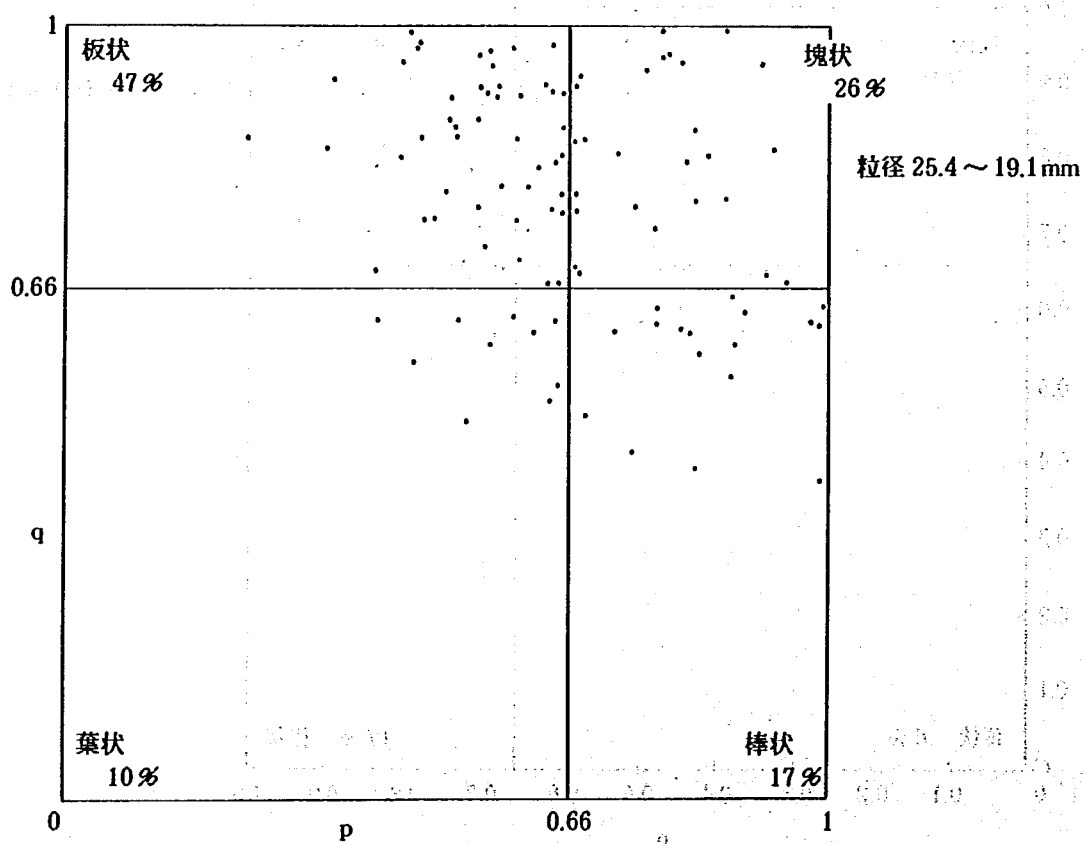
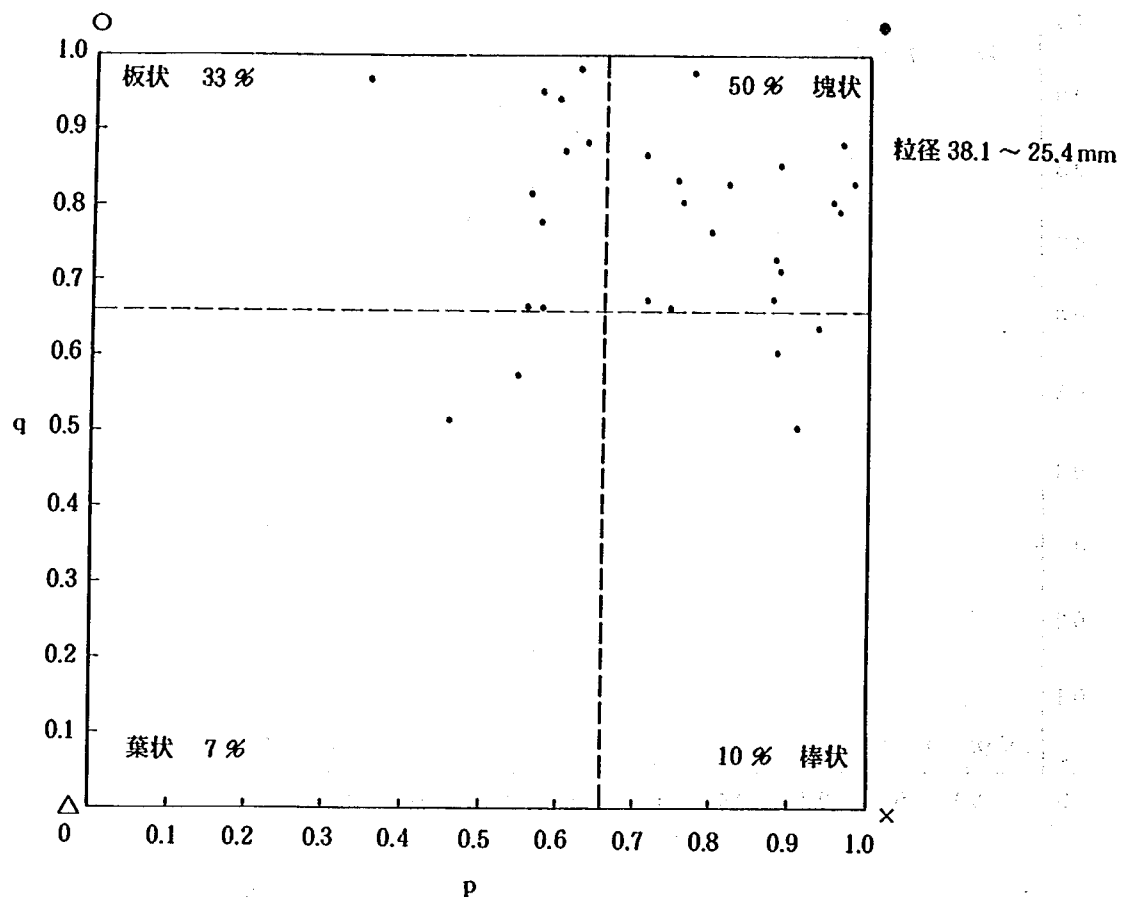
- 1) 河川管理施設等構造令施行規則 第10条
- 2) 土質工学会：土質試験法，pp.495-536，1979
- 3) 松本徳久・渡辺和夫・小川優：ロック材料の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験，土木研究所資料，第1788号，1982
- 4) 土質工学会：ロックフィル材料の試験と設計強度，1982
- 5) 建設省河川局：多目的ダムの建設，第3巻，1977
- 6) 電力土木技術協会：最新フィルダム工学，1981
- 7) Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B. and Duncan, J.M. : " Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials," Report No. TE-69-5 to State of California Department of Water Resources, Univ. of California, 1969
- 8) 水資源開発公団，中部電力株式会社：岩屋ダム工事誌，1978
- 9) 野田 耕，谷本喜一，長谷康生：砂の力学的性質に及ぼす粒度と密度との影響について，第8回土質工学研究発表会講演集，pp. 153-156，1973
- 10) 酒井徳行，鎌田正孝，石井武美，栗原明美：粗粒材の大型・中型三軸圧縮試験結果の比較，第12回土質工学研究発表会講演集，pp.357-360，1977
- 11) 水野光章，大藪勝美，貞弘丈佳：フィルダム材料の最適試験手法に関する研究，水資源開発公団試験所第一試験課報告第7803号，1979
- 12) 水野光章，大藪勝美，貞弘丈佳：フィルダム材料の最適試験手法に関する研究，水資源開発公団試験所第一試験課報告第7916号，1980
- 13) 石川 明，大塚 一，井口芳博：ロックフィルダムの大型試験機による材料試験，水と土，第28号，pp. 20-29，1977
- 14) Holtz, W. G. and Gibbs, H. J. " Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils," Proc. A. S. C. E. SMI, pp.1-22, January 1956
- 15) 最上武雄編：土質力学，pp.896-904，技報堂，1969
- 16) 平松良雄，岡 行俊，木山英郎：非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験，日本鉱業会誌，Vol. 81, No.932，pp.1024-1030，1965
- 17) 最上武雄編：土質力学，pp. 998-1032，技報堂，1969
- 18) 土質工学会：土質試験法，pp. 520，1979

付 図 集

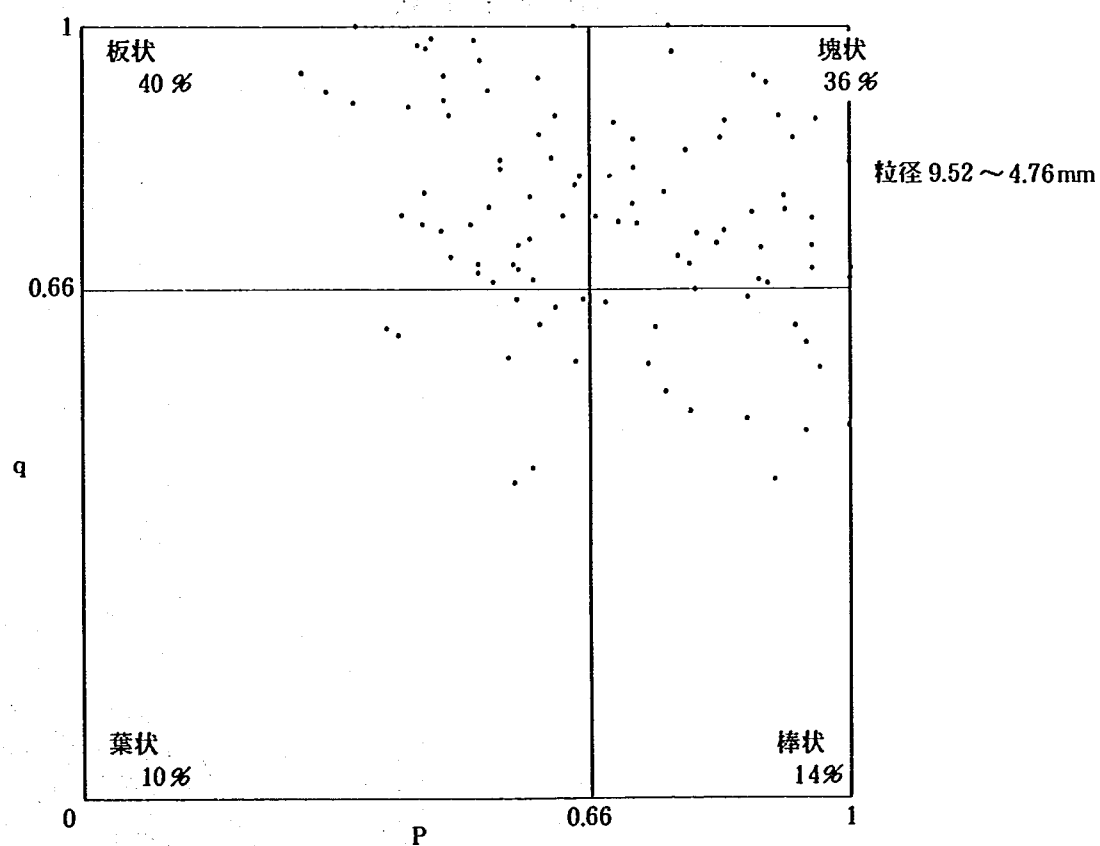
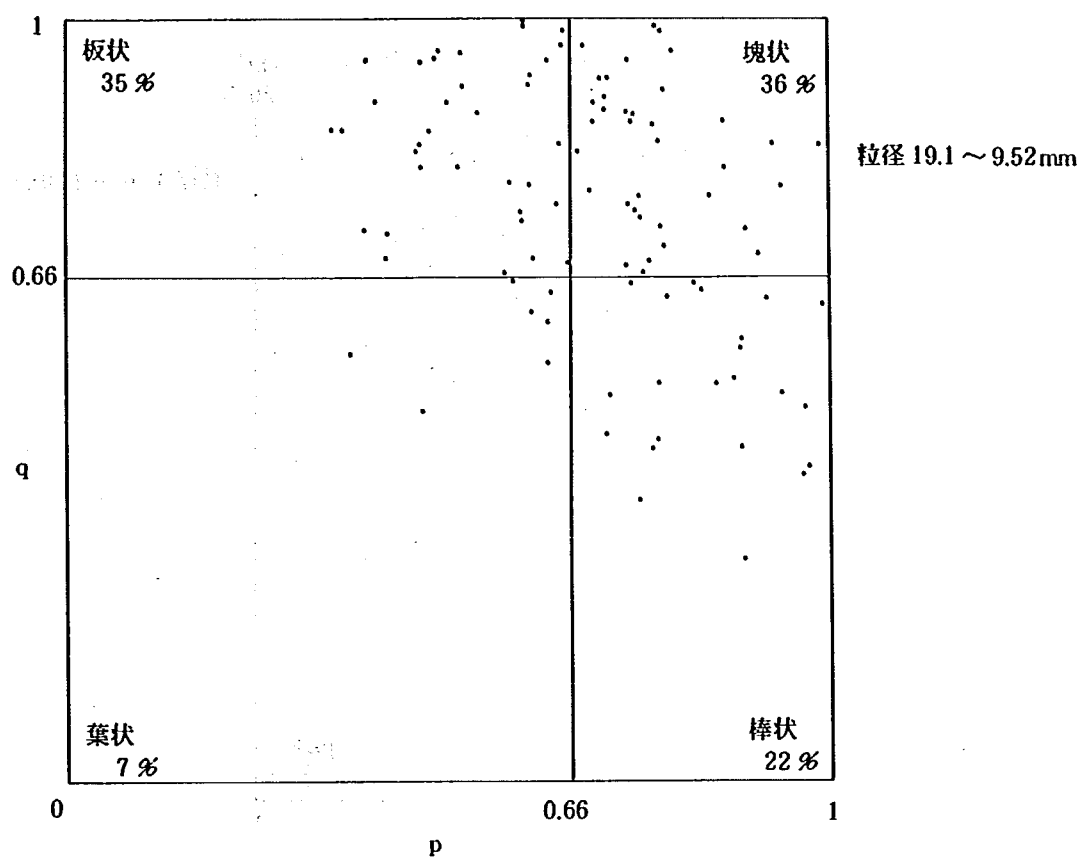
1 M 11



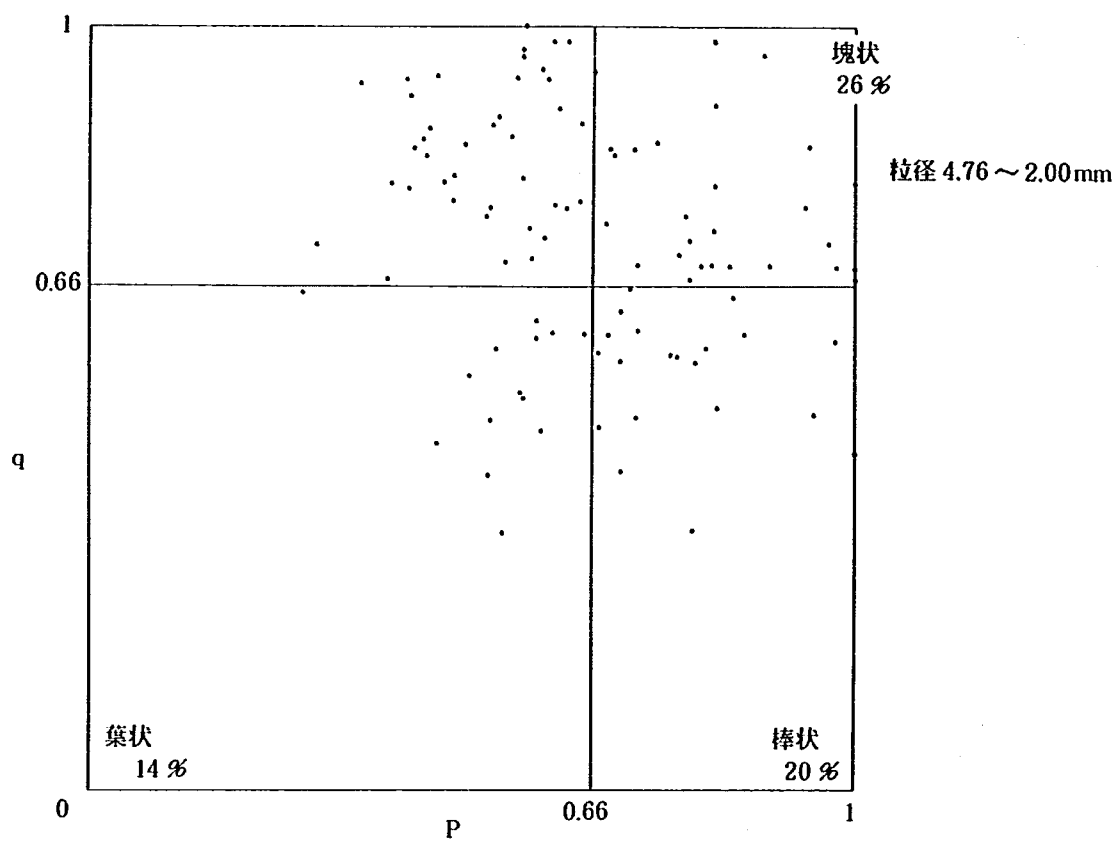
付図-1(1) 粒子形状



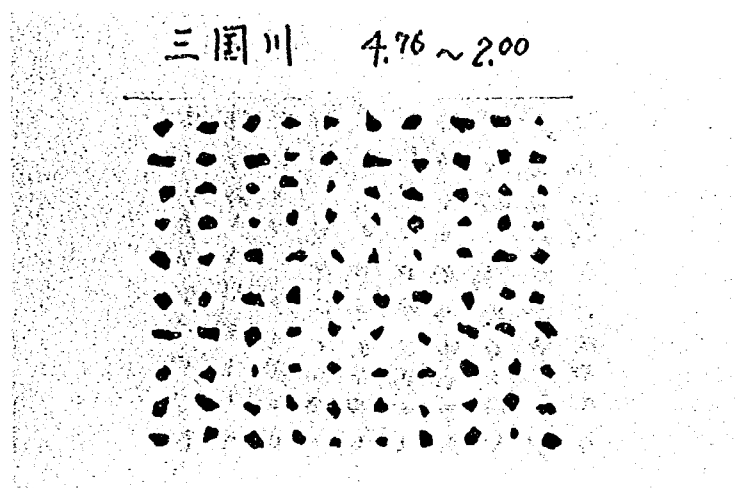
付図-1(2) 粒子形状



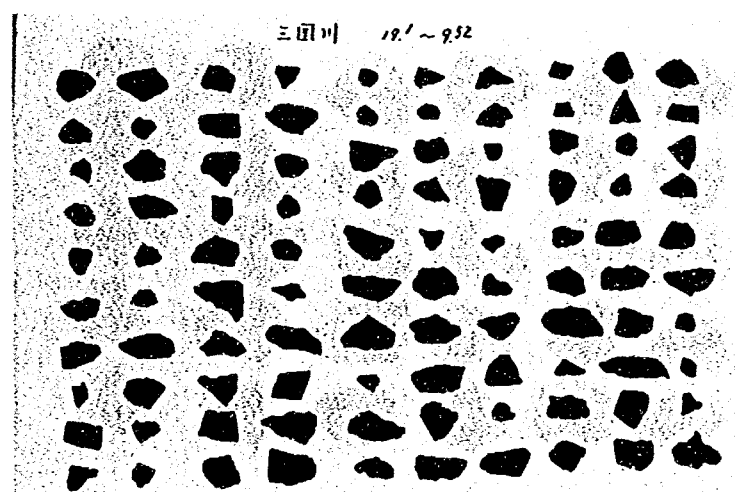
付図-1(3) 粒子形状



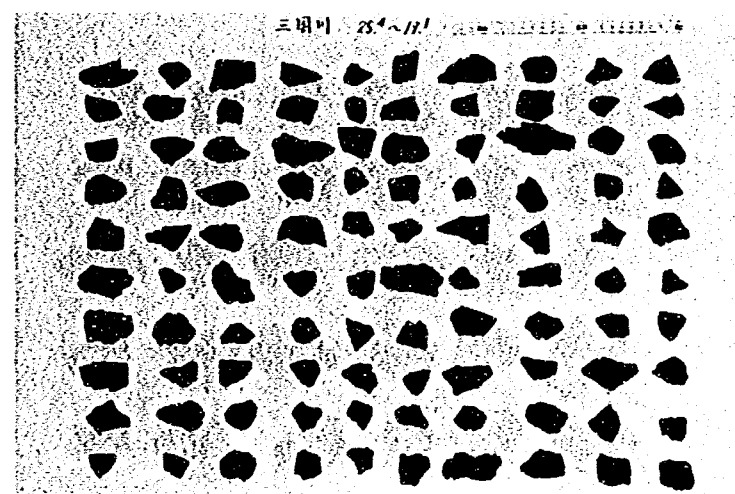
付図-1(4) 粒子形状



粒径 4.76 ~ 2.00mm



粒径 19.1 ~ 9.52mm

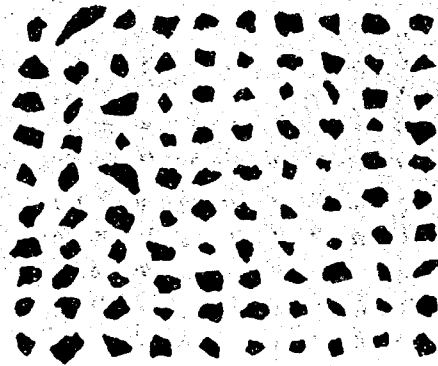


粒径 25.4 ~ 19.1mm

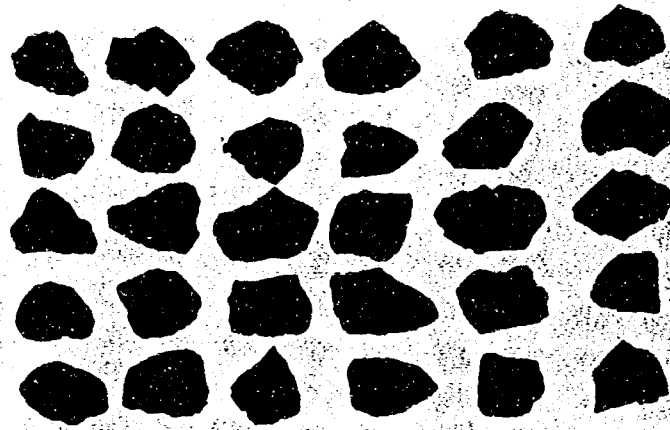
付図-2(1) 粒子の外観

三国川 9.52 ~ 4.76

粒径 9.52 ~ 4.76mm

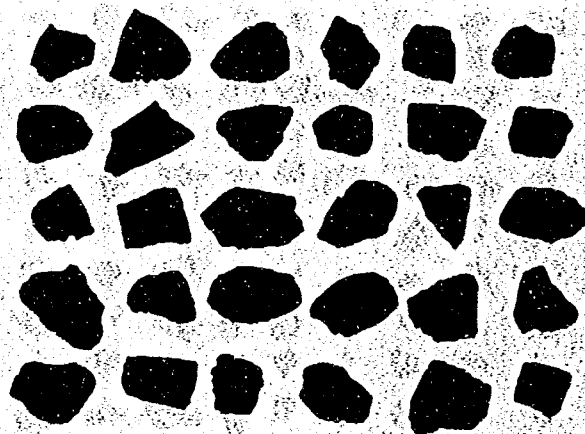


粒径 63.5 ~ 50.6mm



三国川 50.8 ~ 38.1

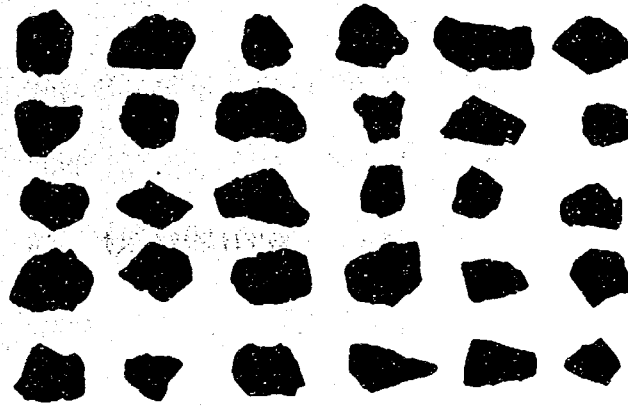
粒径 50.8 ~ 38.1mm



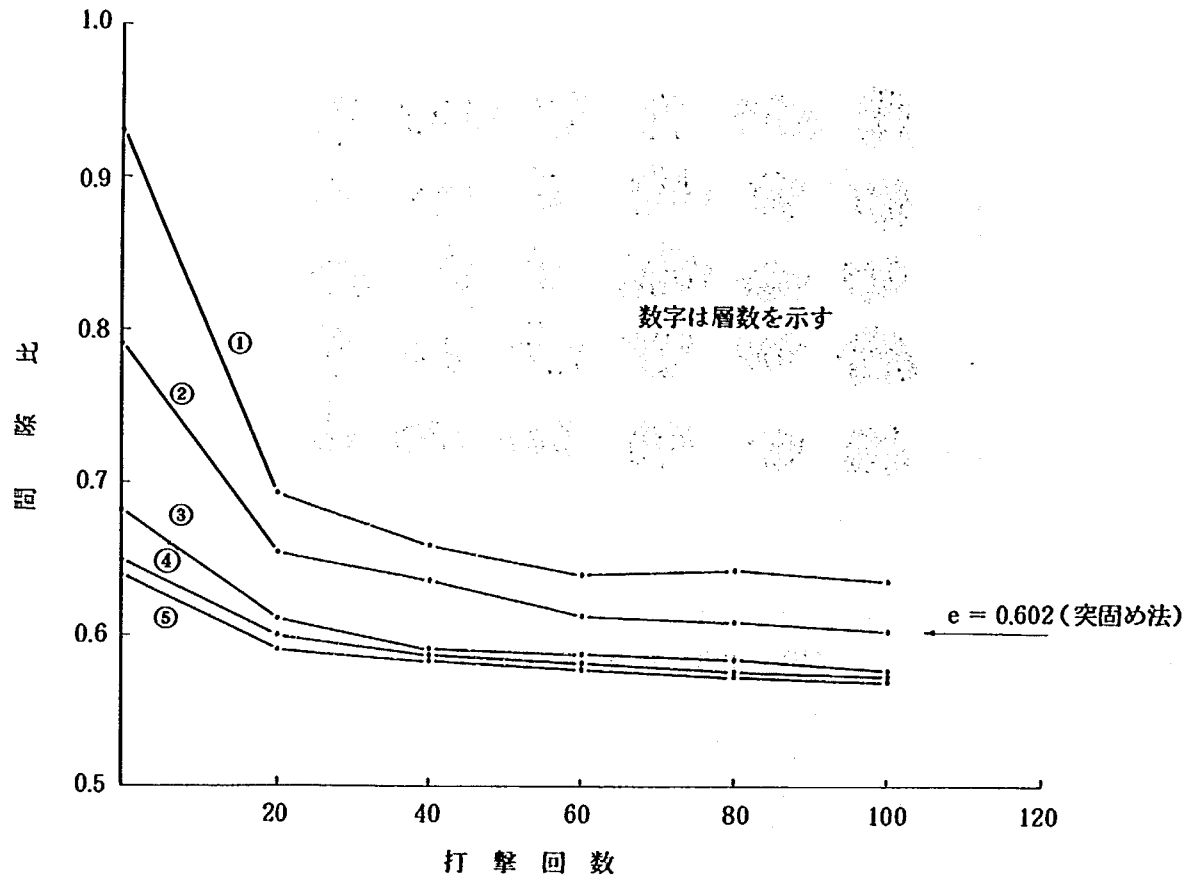
付図-2(2) 粒子の外観

三田川 38.1 ~ 25.4

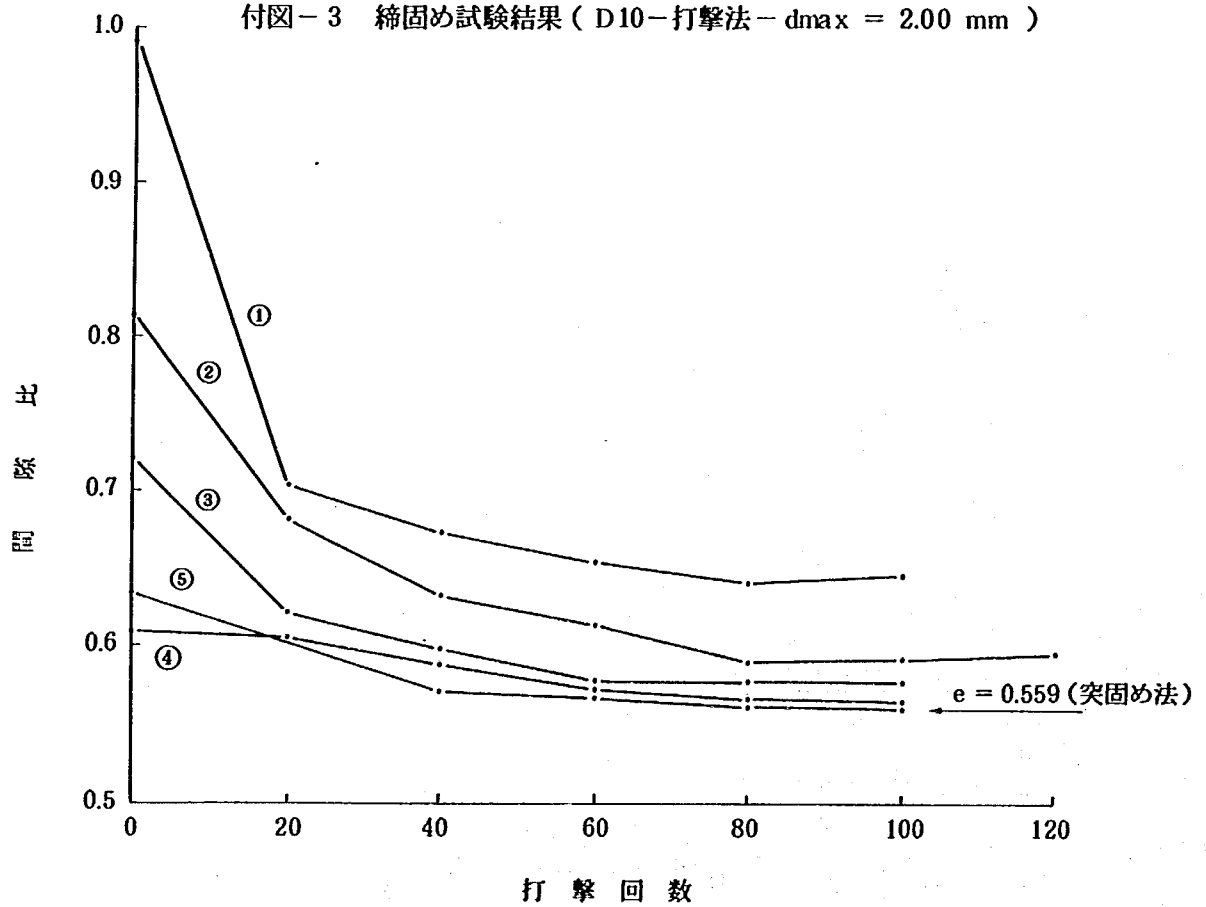
粒径 38.1 ~ 25.4 mm



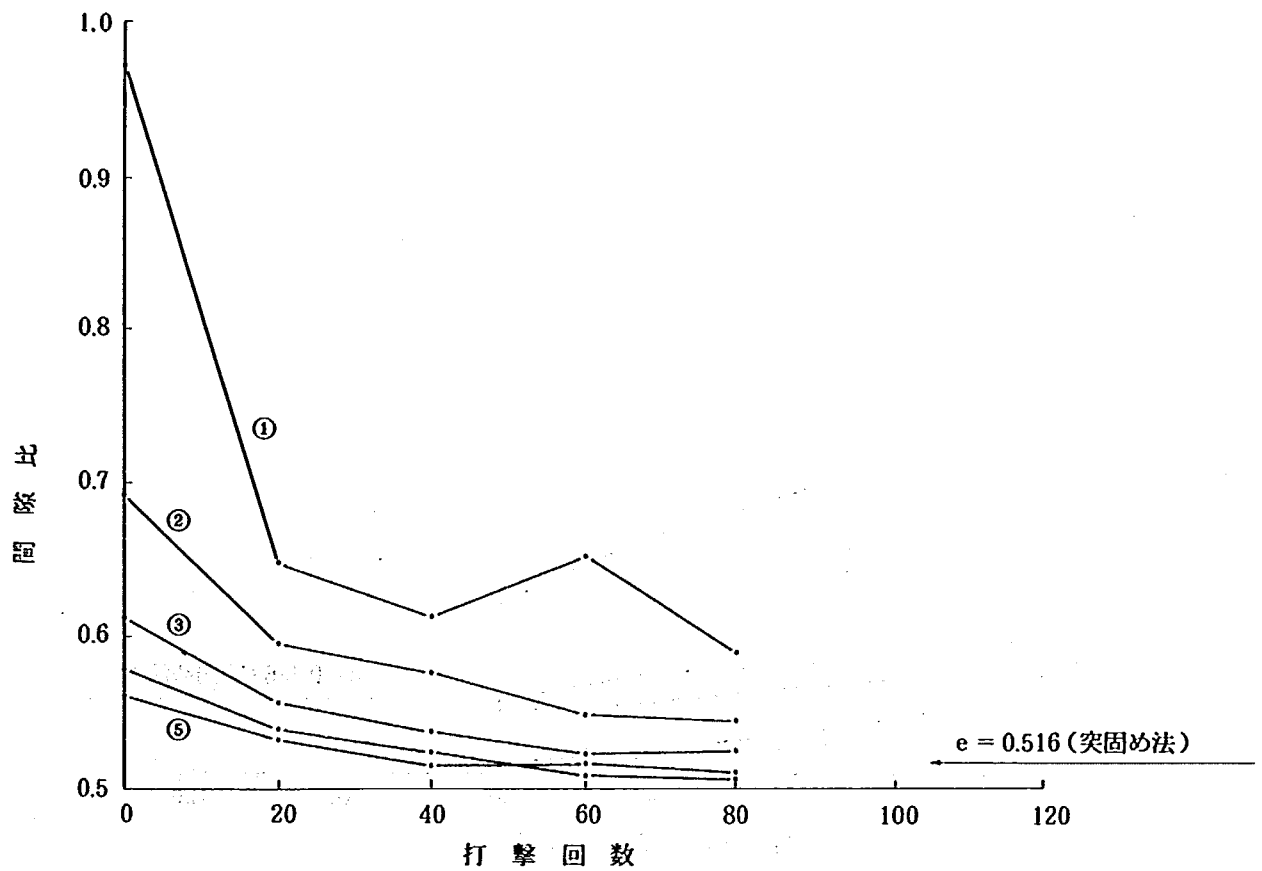
付図-2(3) 粒子の外観



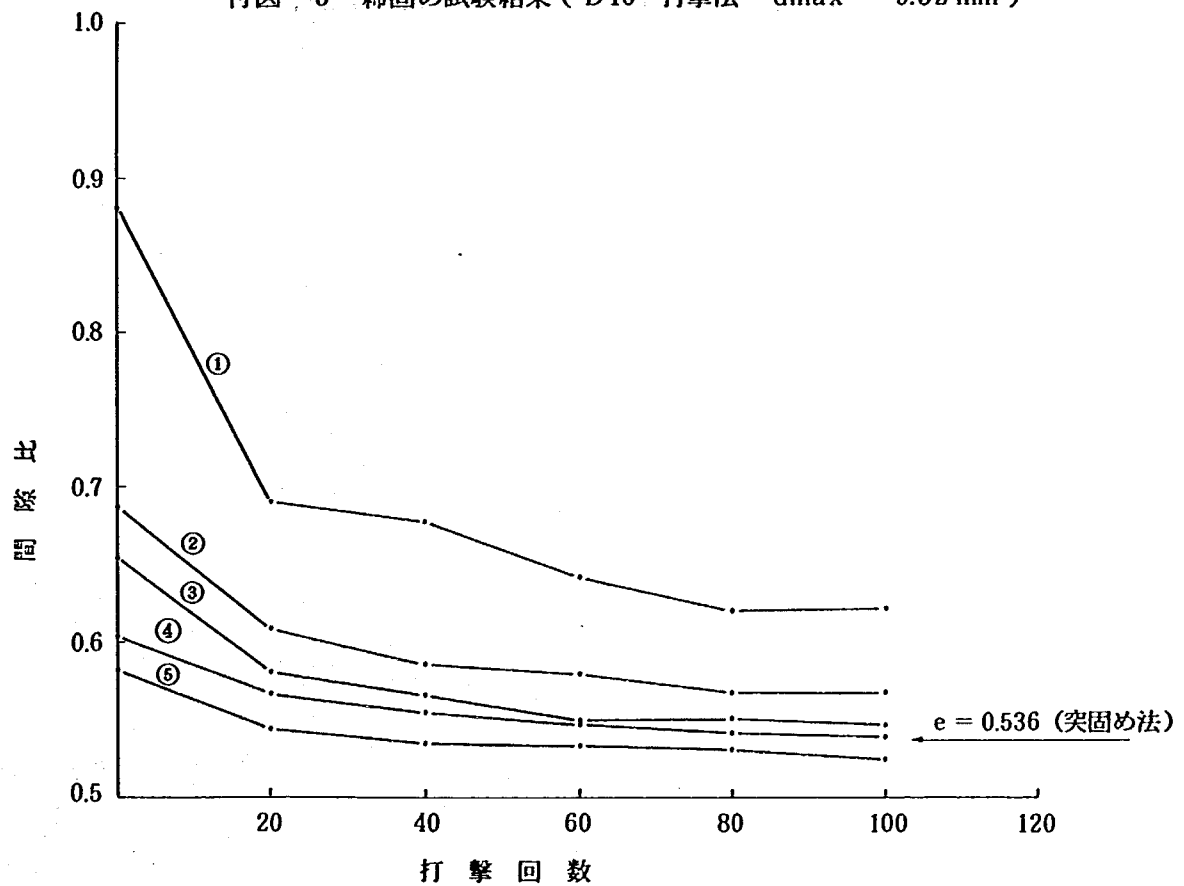
付図-3 締固め試験結果 (D10-打撃法 - $d_{max} = 2.00 \text{ mm}$)



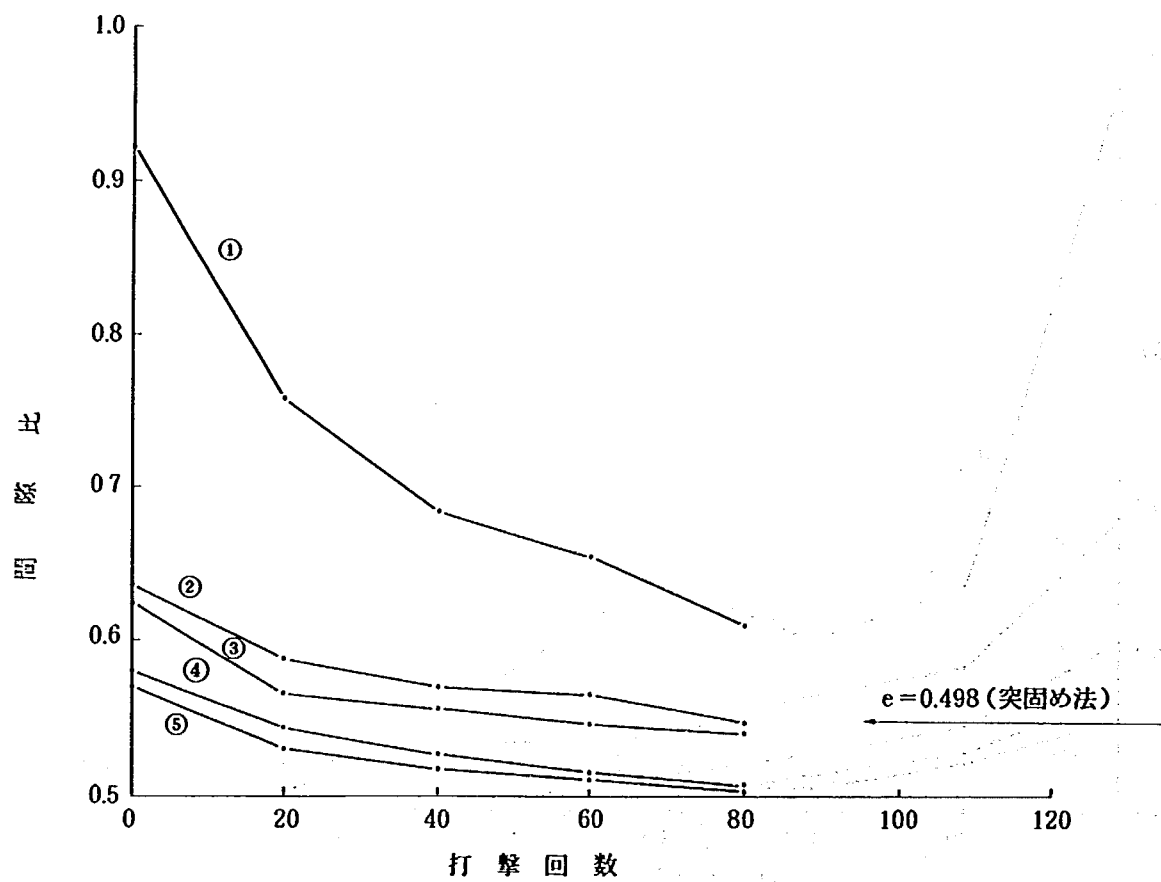
付図-4 締固め試験結果 (D10-打撃法 - $d_{max} = 4.76 \text{ mm}$)



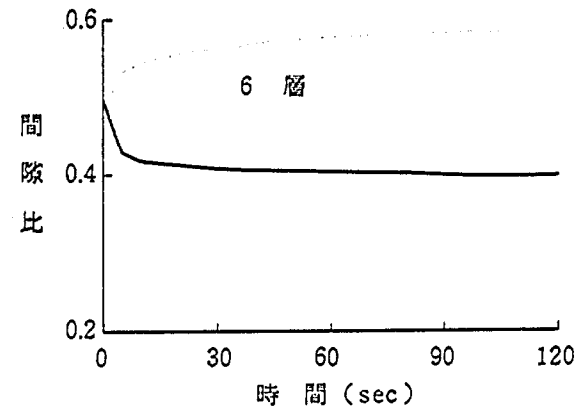
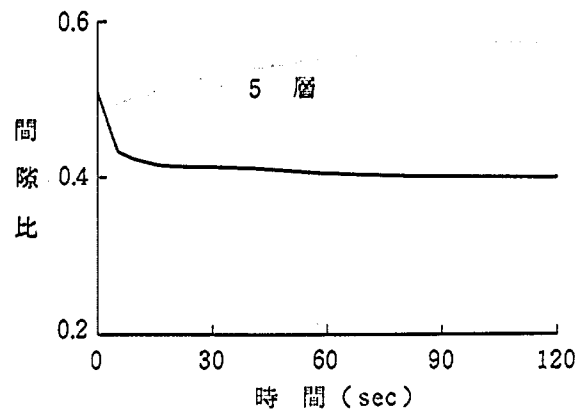
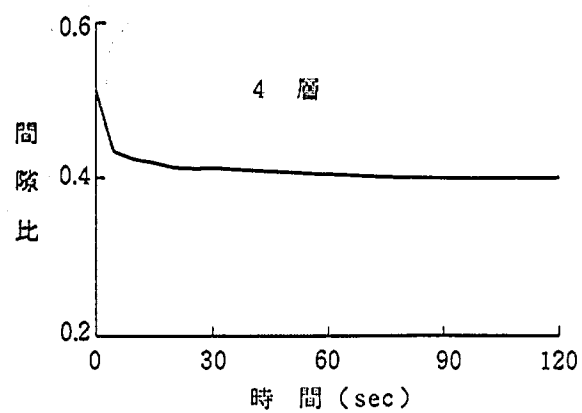
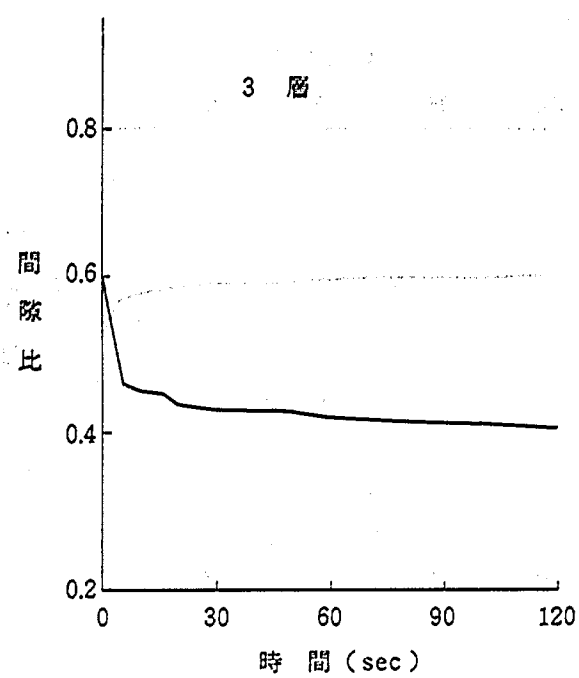
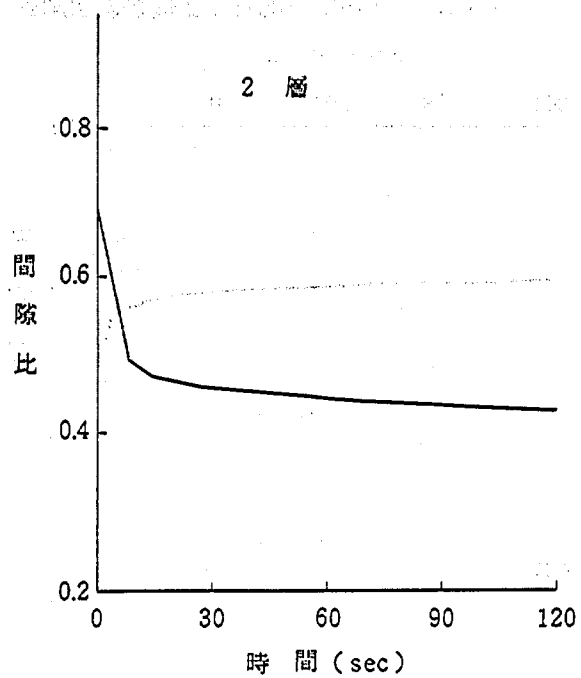
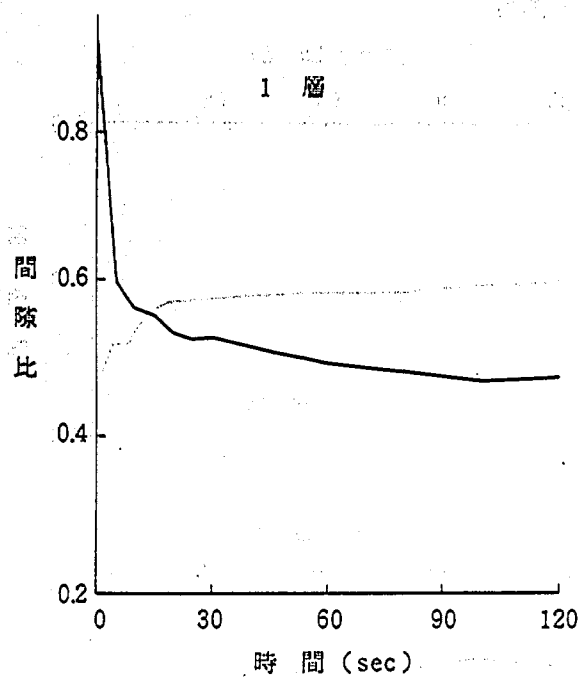
付図-5 締固め試験結果 (D10-打撃法- $d_{max} = 9.52$ mm)



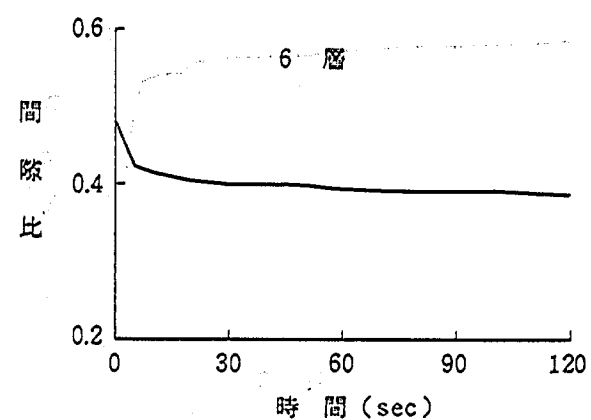
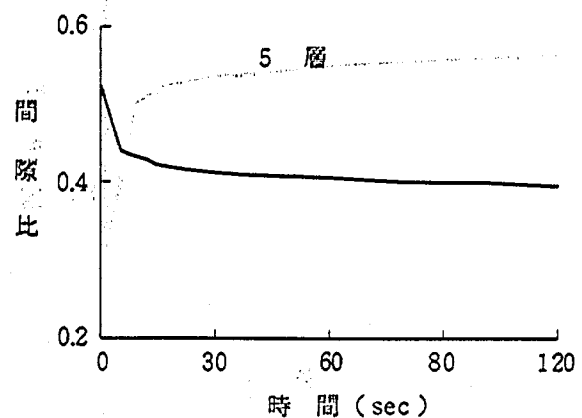
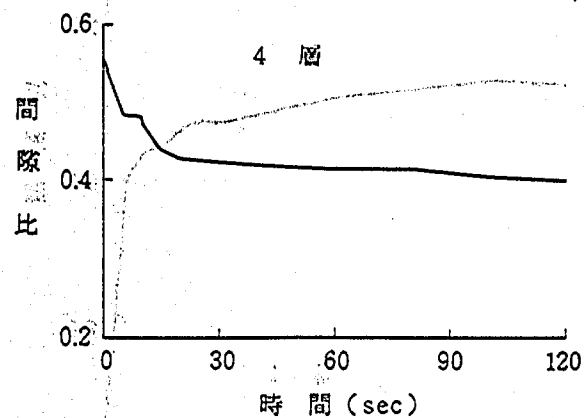
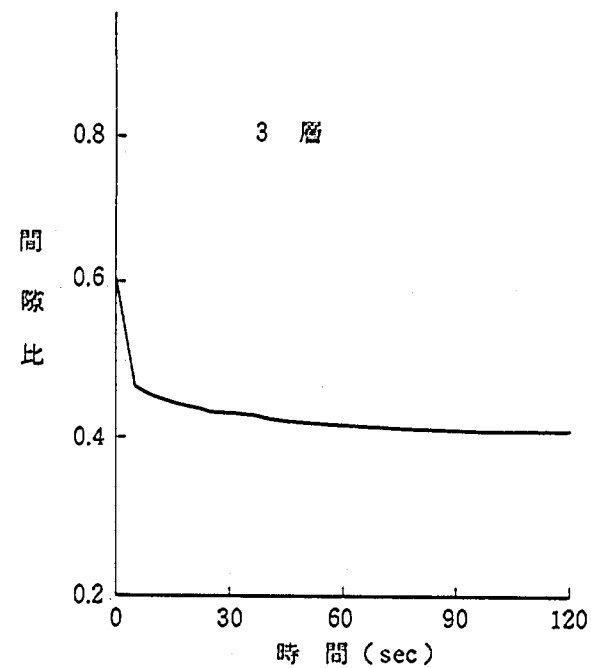
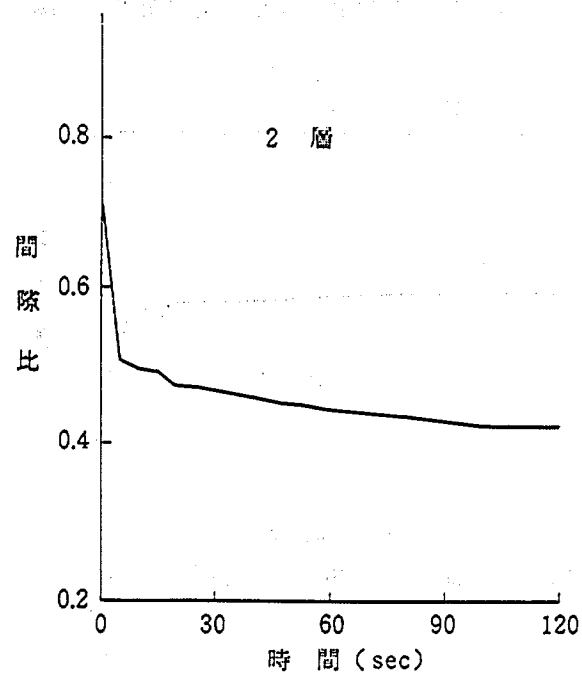
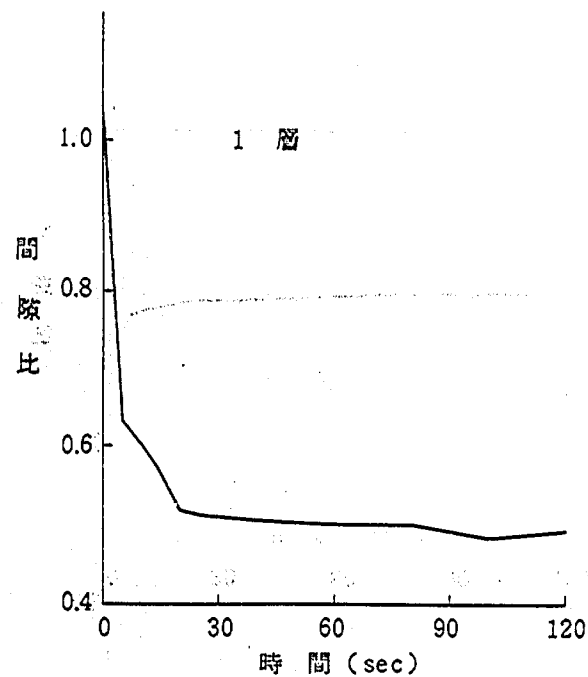
付図-6 締固め試験結果 (D10-打撃法- $d_{max} = 19.1$ mm)



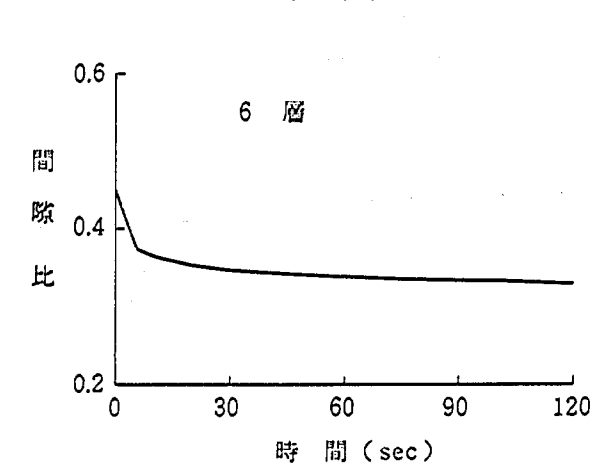
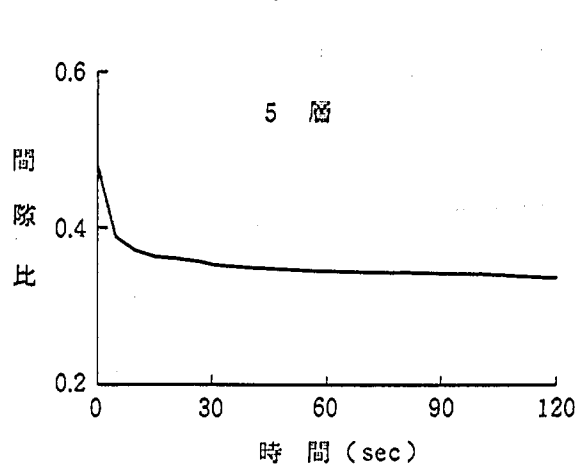
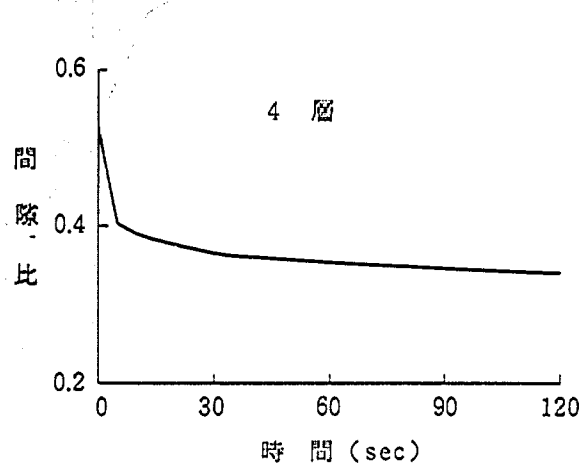
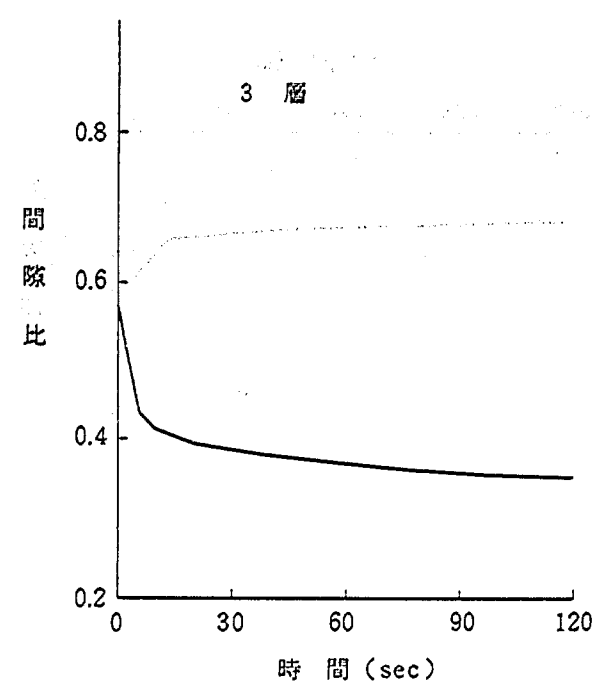
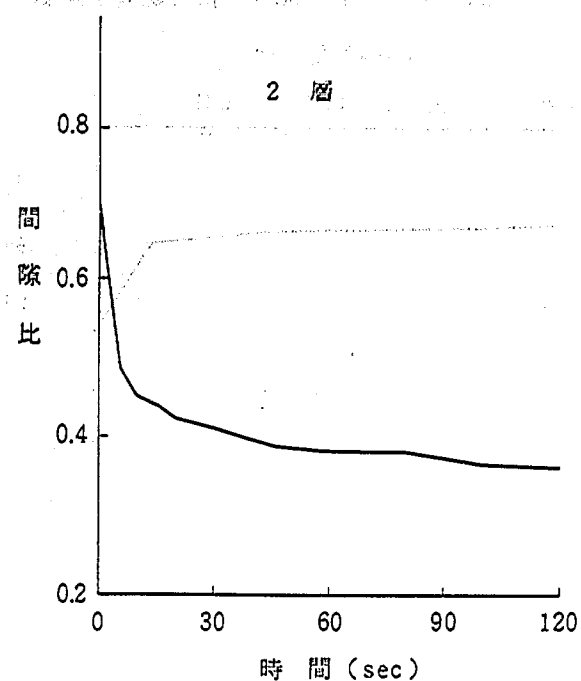
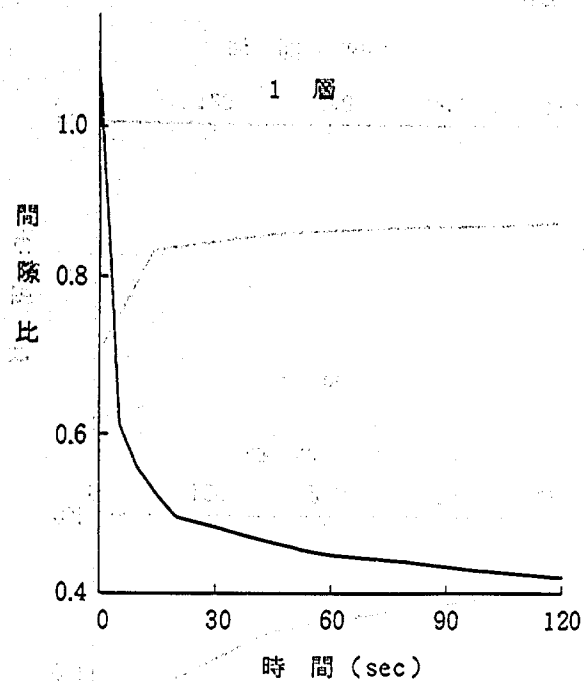
付図-7 締固め試験結果 (D10-打撃法 - $d_{max} = 25.4 \text{ mm}$)



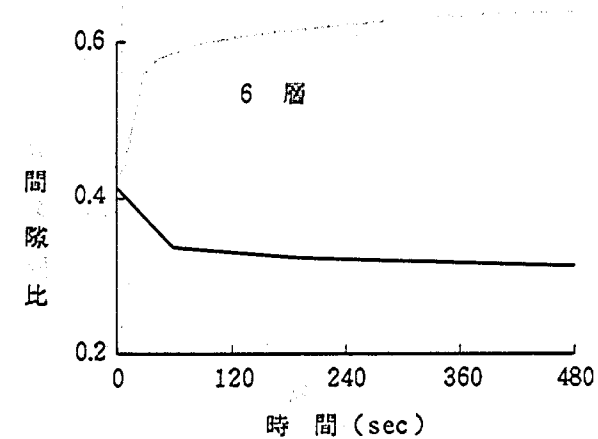
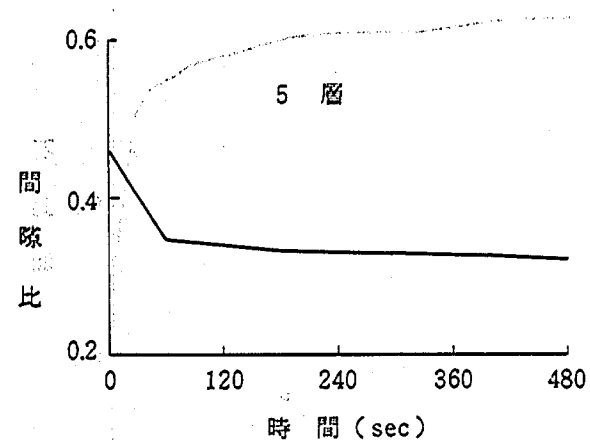
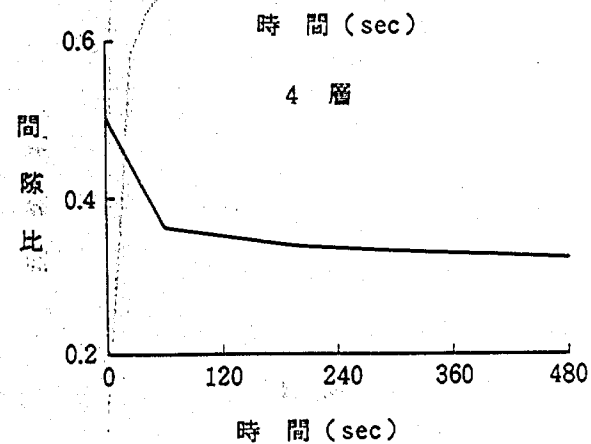
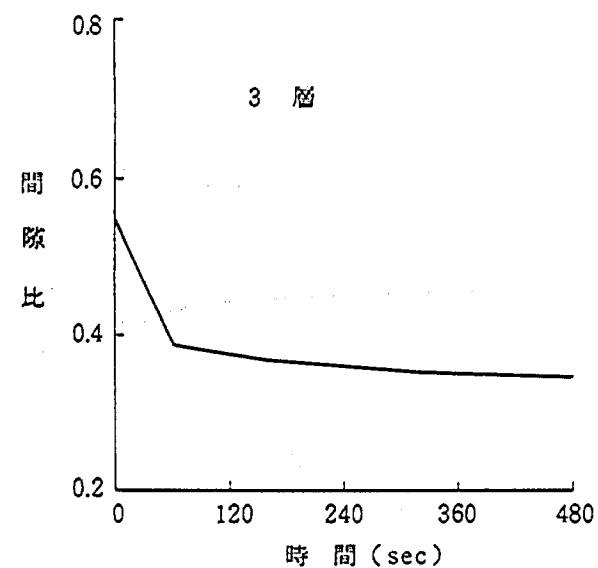
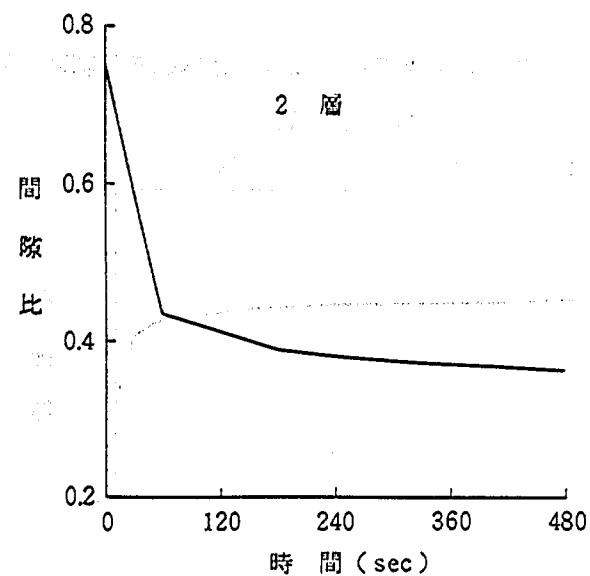
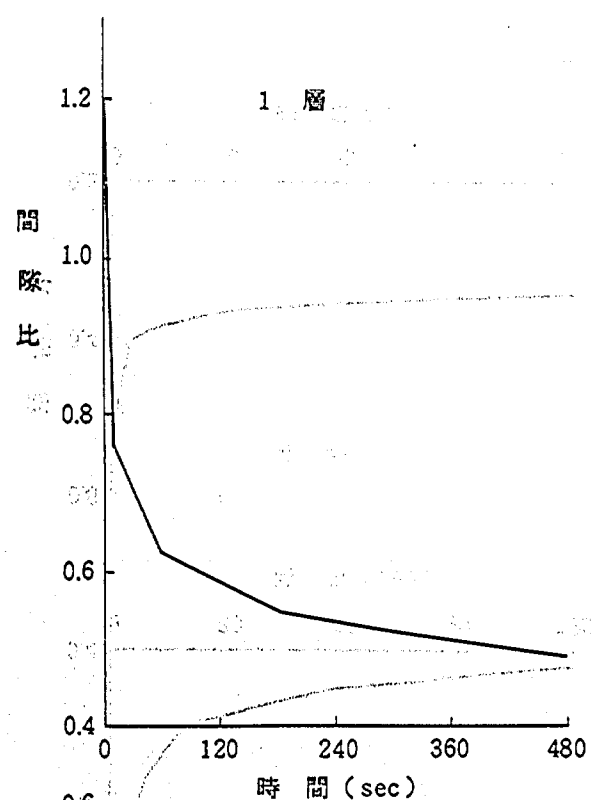
付図 - 8 締固め試験結果 ($D_{30} - d_{max} = 9.52 \text{ mm}$)



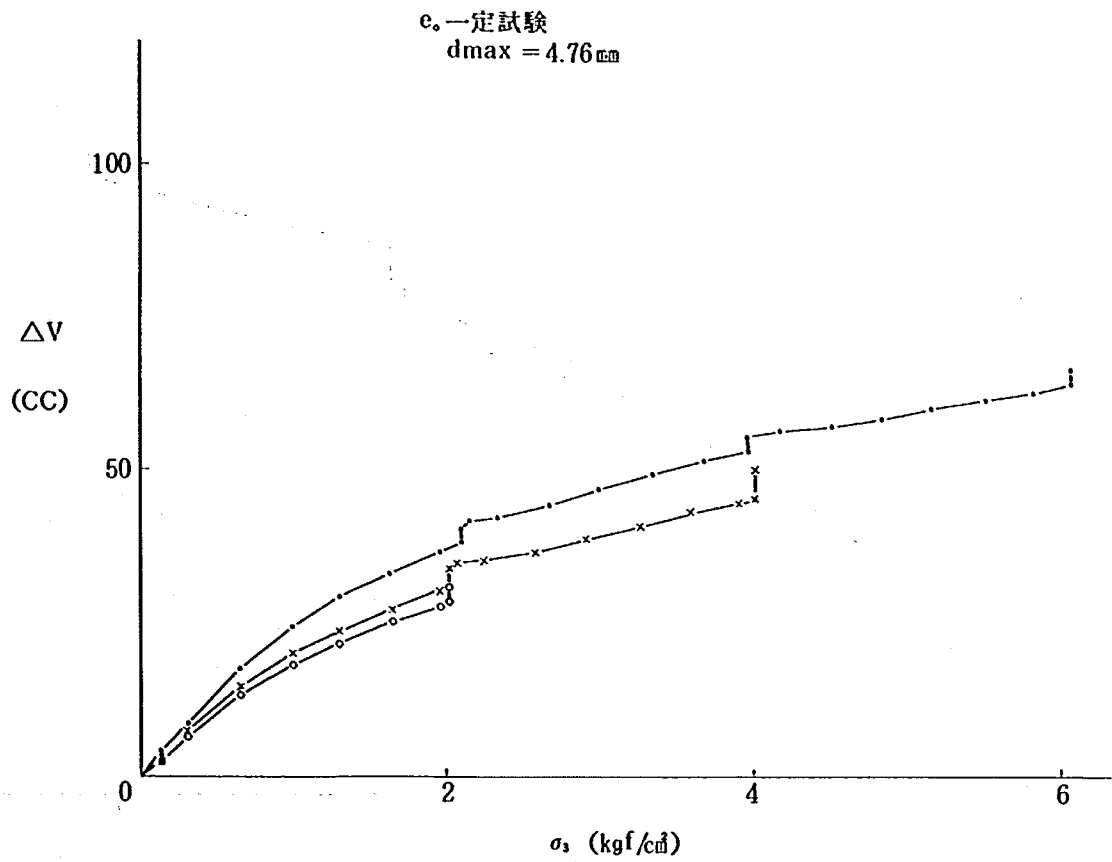
付図-9 締固め試験結果 (D30-dmax = 19.1 mm)



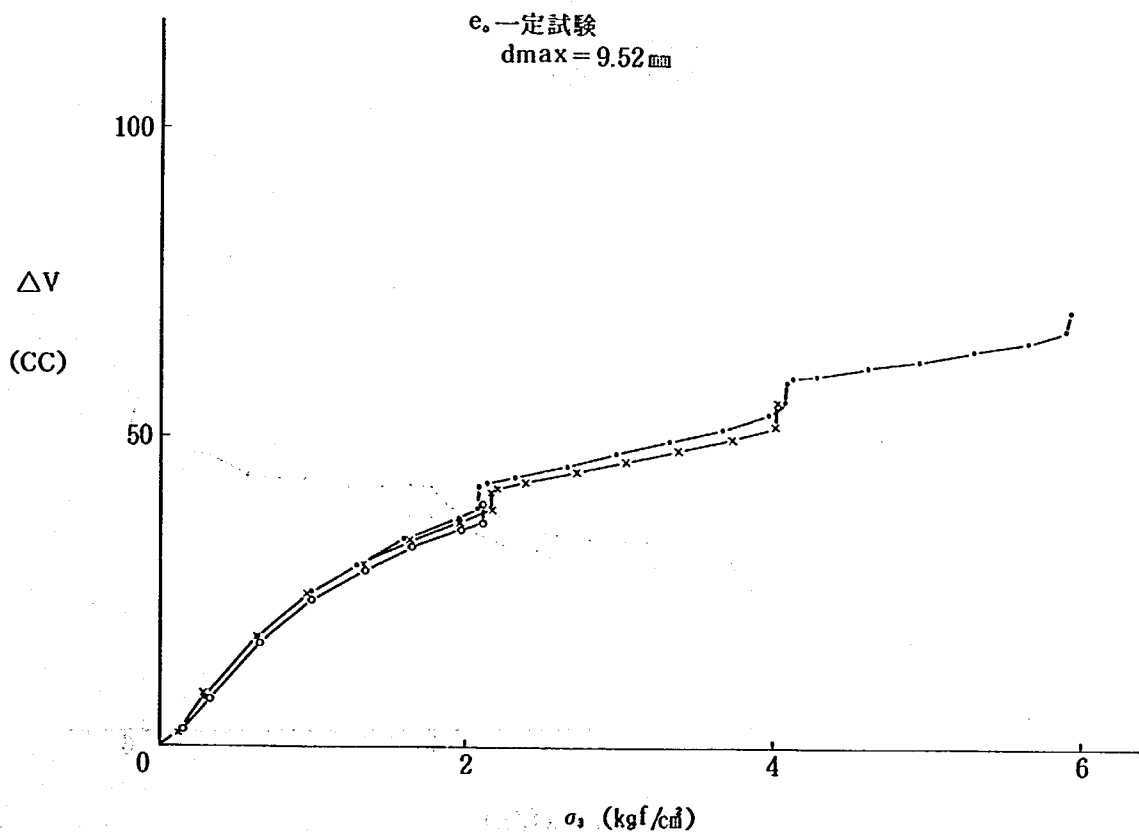
付図-10 締固め試験結果 (D30 - $d_{max} = 38.1 \text{ mm}$)



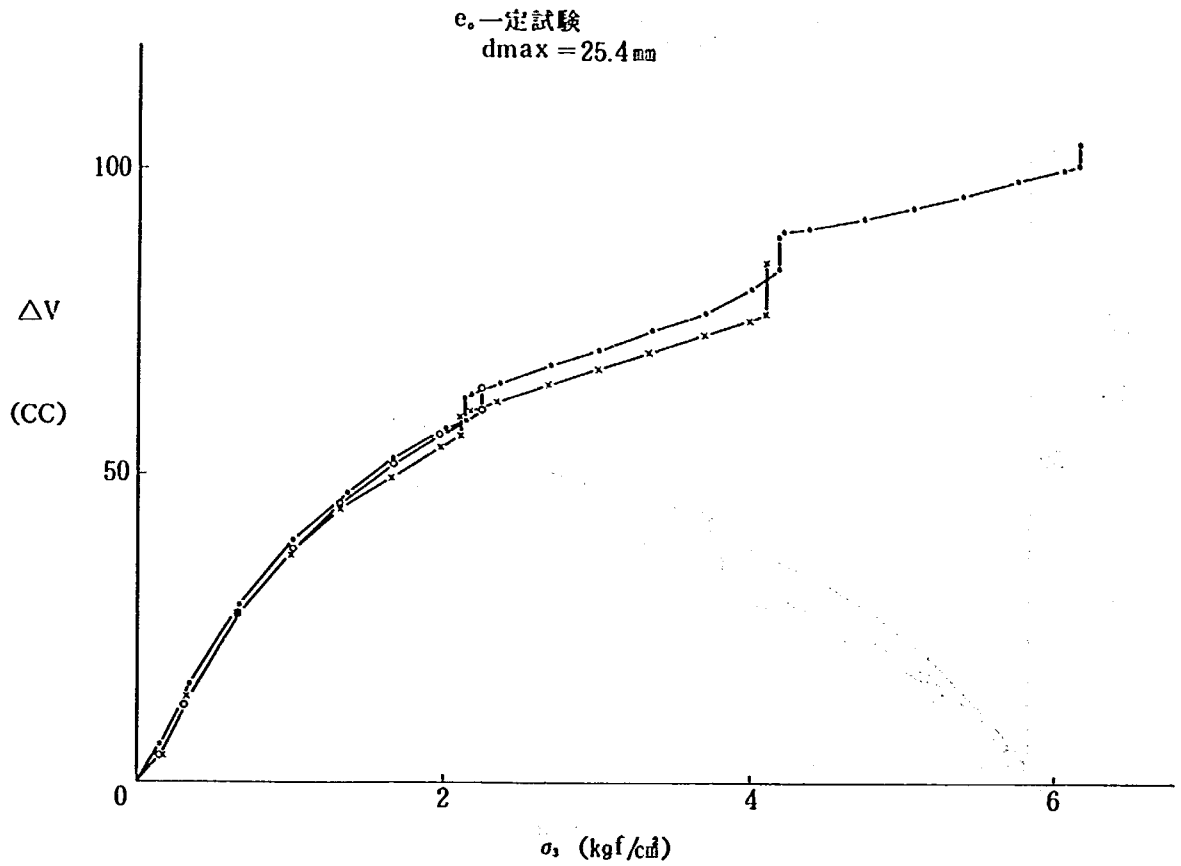
付図-11 締固め試験結果 (D30 - $d_{max} = 63.5\text{mm}$)



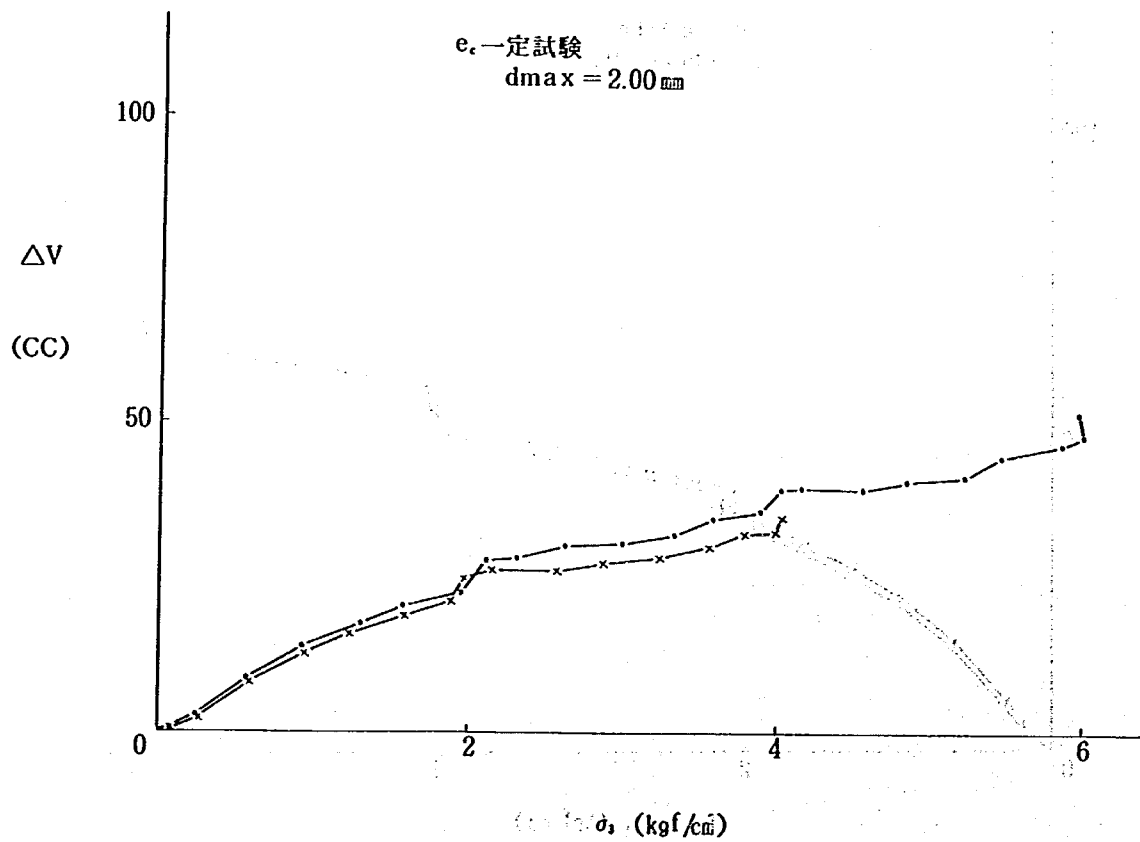
付図-12(1) 側圧と圧密体積変化量 (D10)



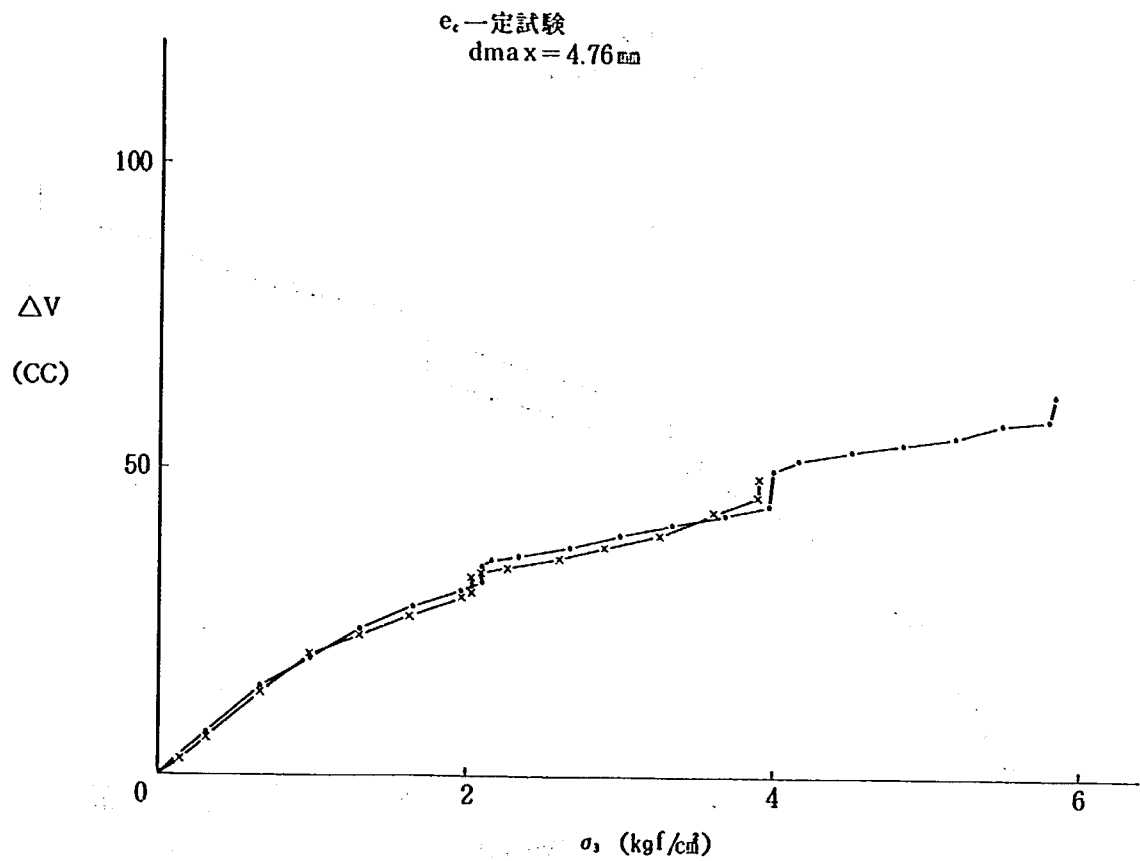
付図-12(2) 側圧と圧密体積変化量 (D10)



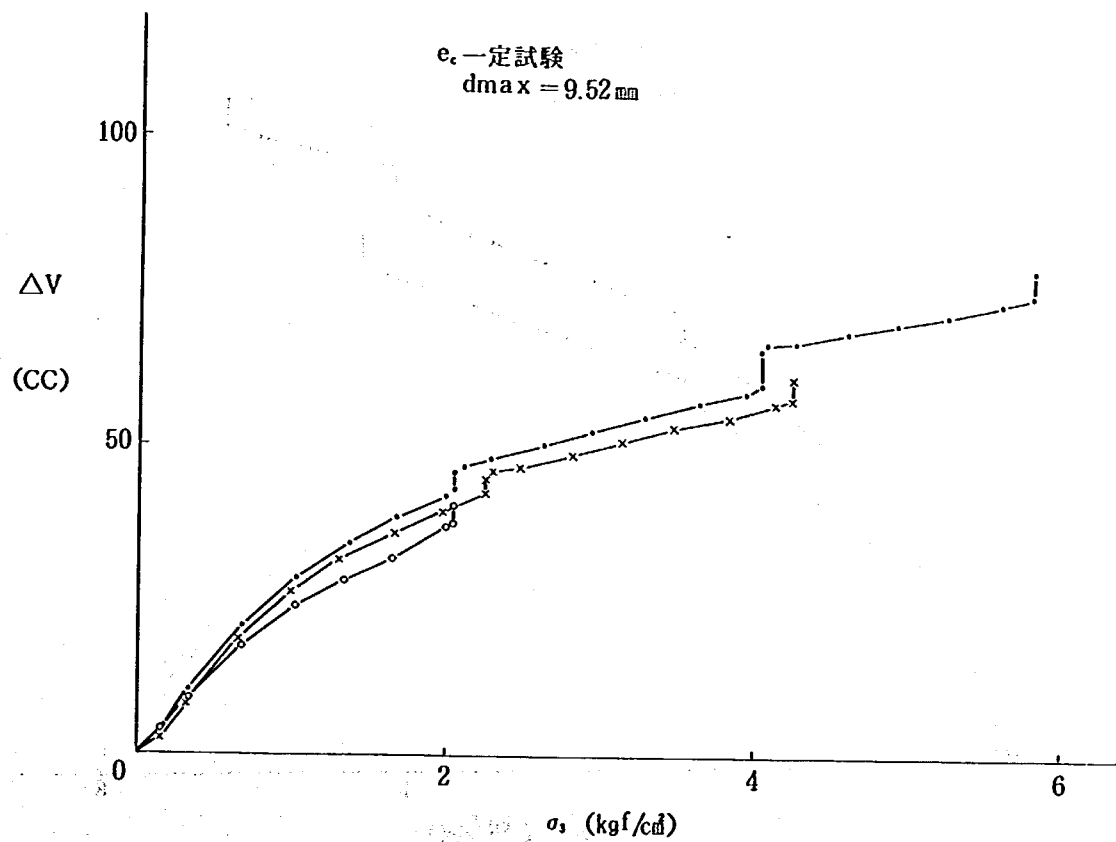
付図-12(3) 側圧と圧密体積変化量 (D10)



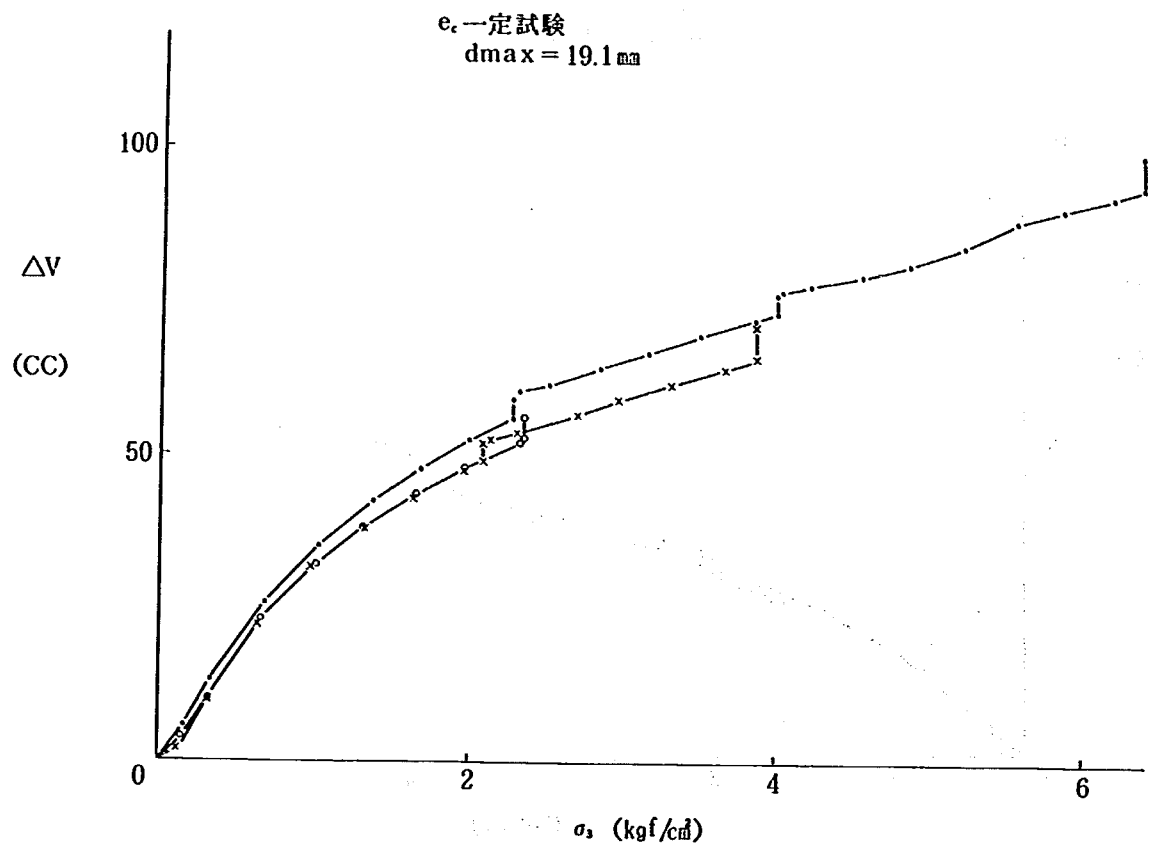
付図-12(4) 側圧と圧密体積変化量 (D10)



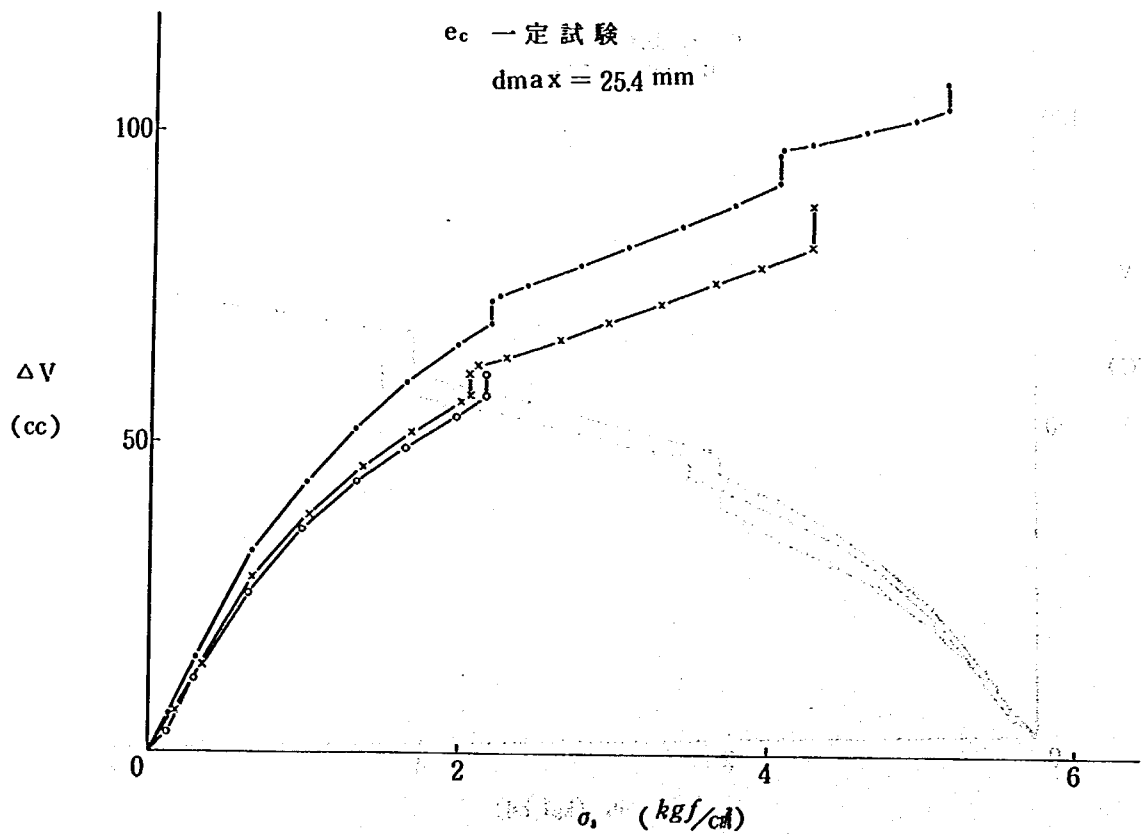
付図-12(5) 側圧と圧密体積変化量 (D10)



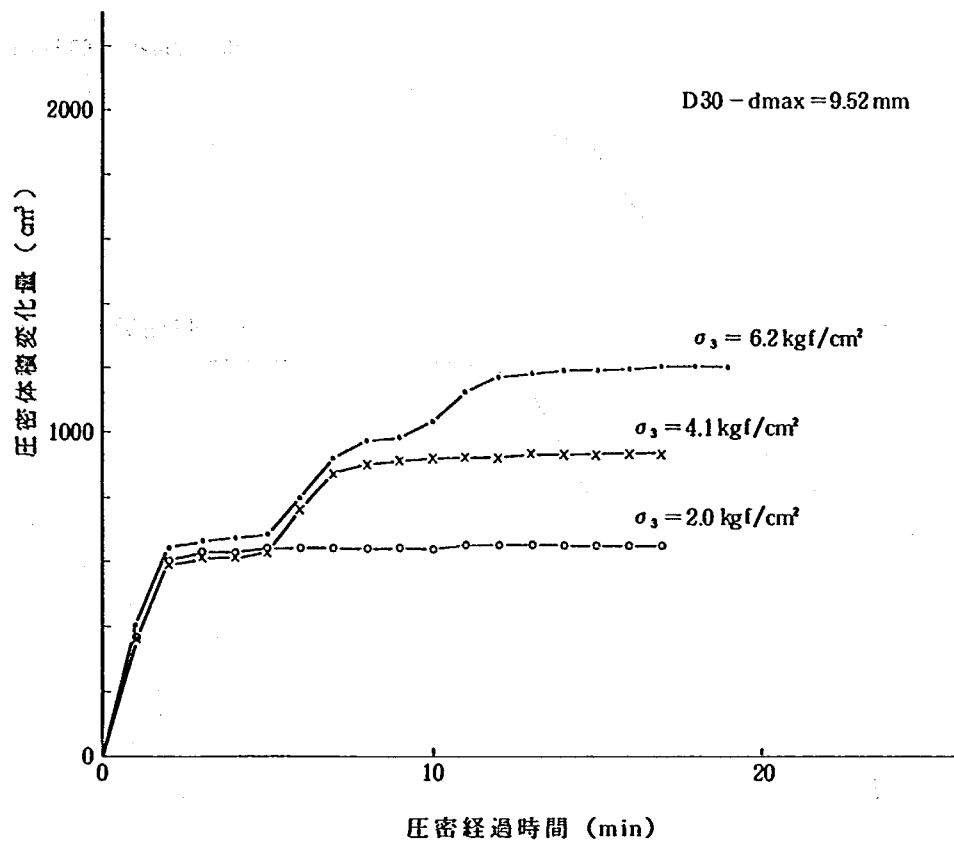
付図-12(6) 側圧と圧密体積変化量 (D10)



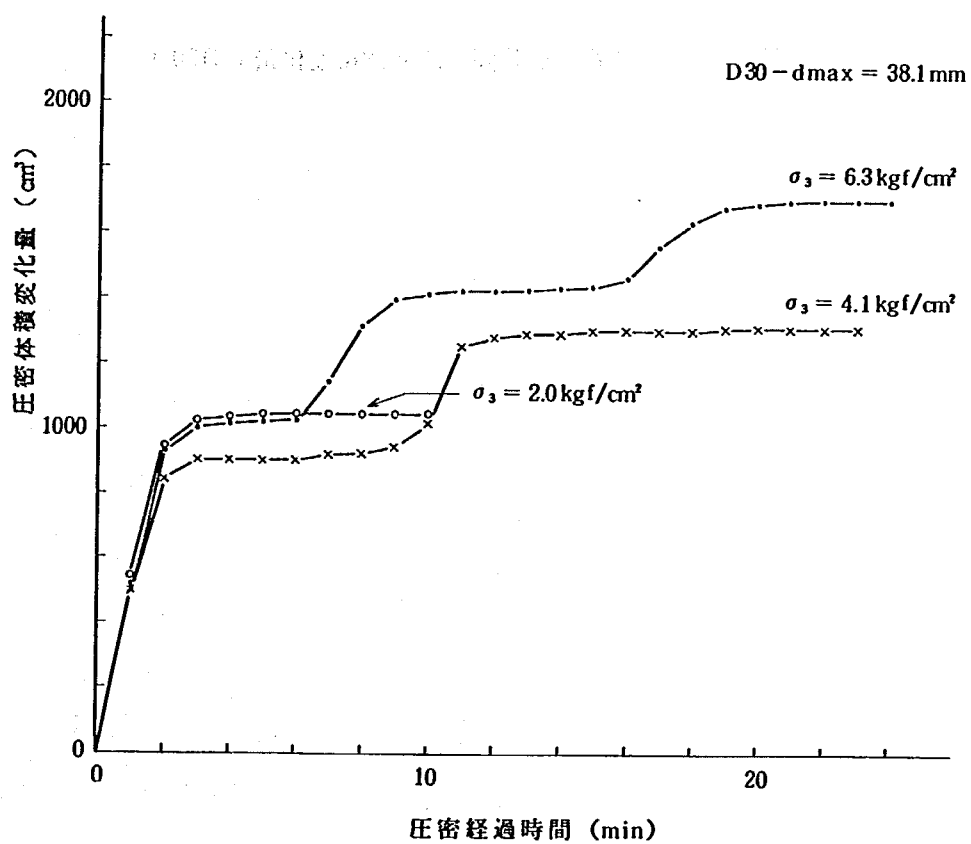
付図-12(7) 側圧と圧密体積変化量 (D10)



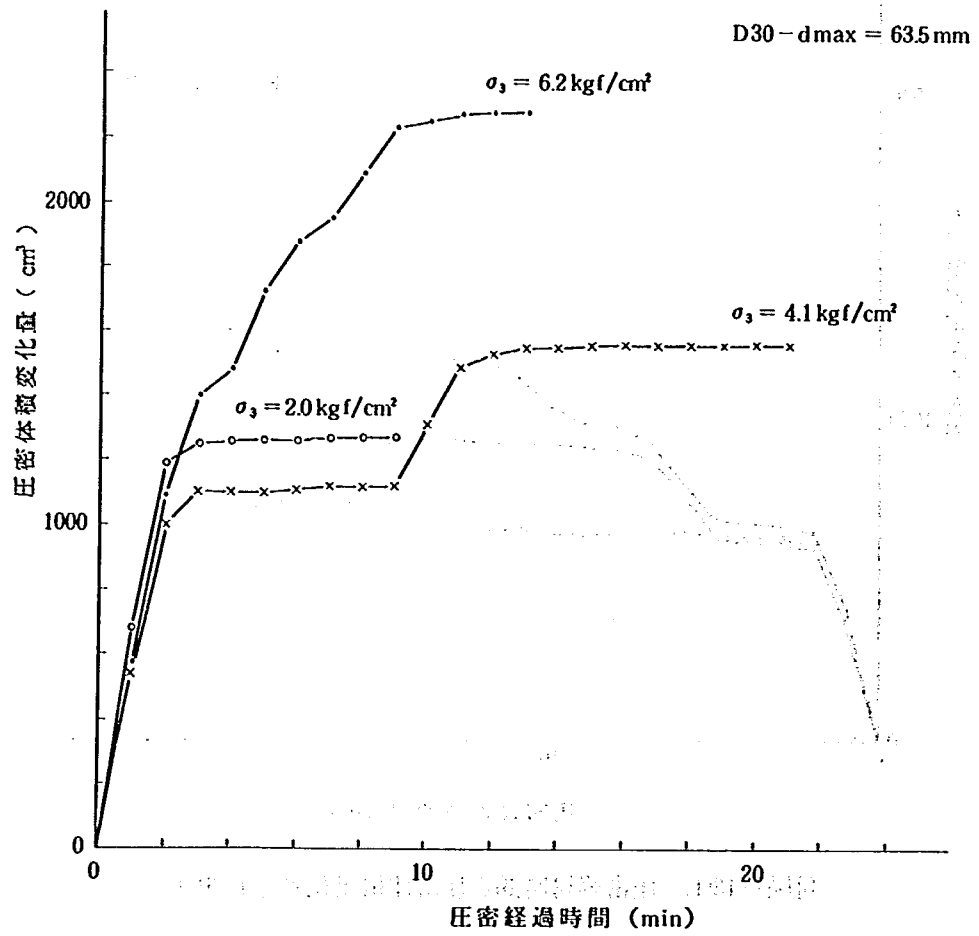
付図-12(8) 側圧と圧密体積変化量 (D10)



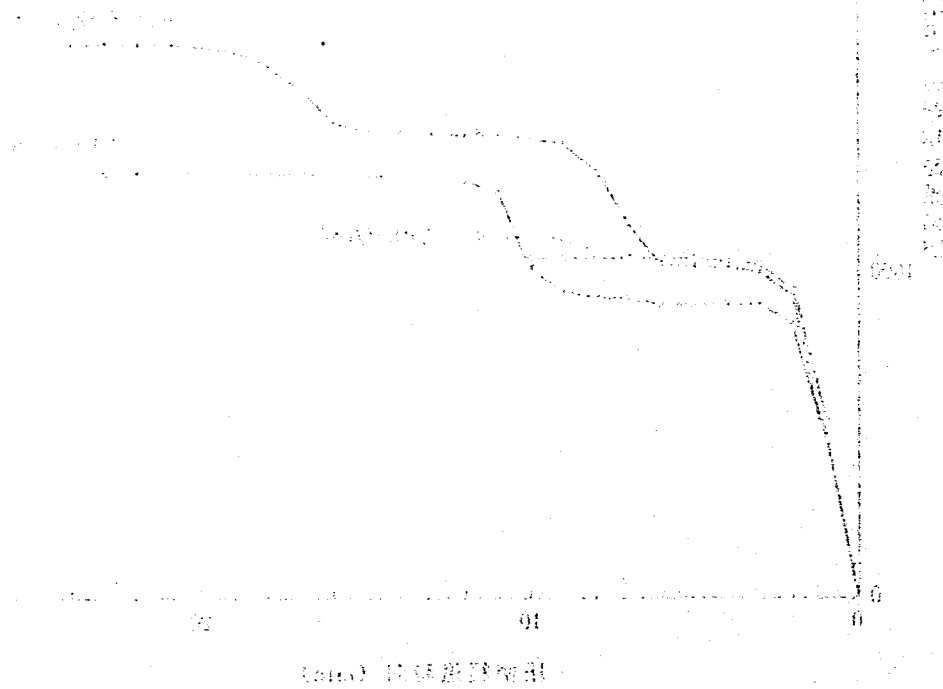
付図-13(1) 圧密経過時間と圧密体積変化量 (D30)

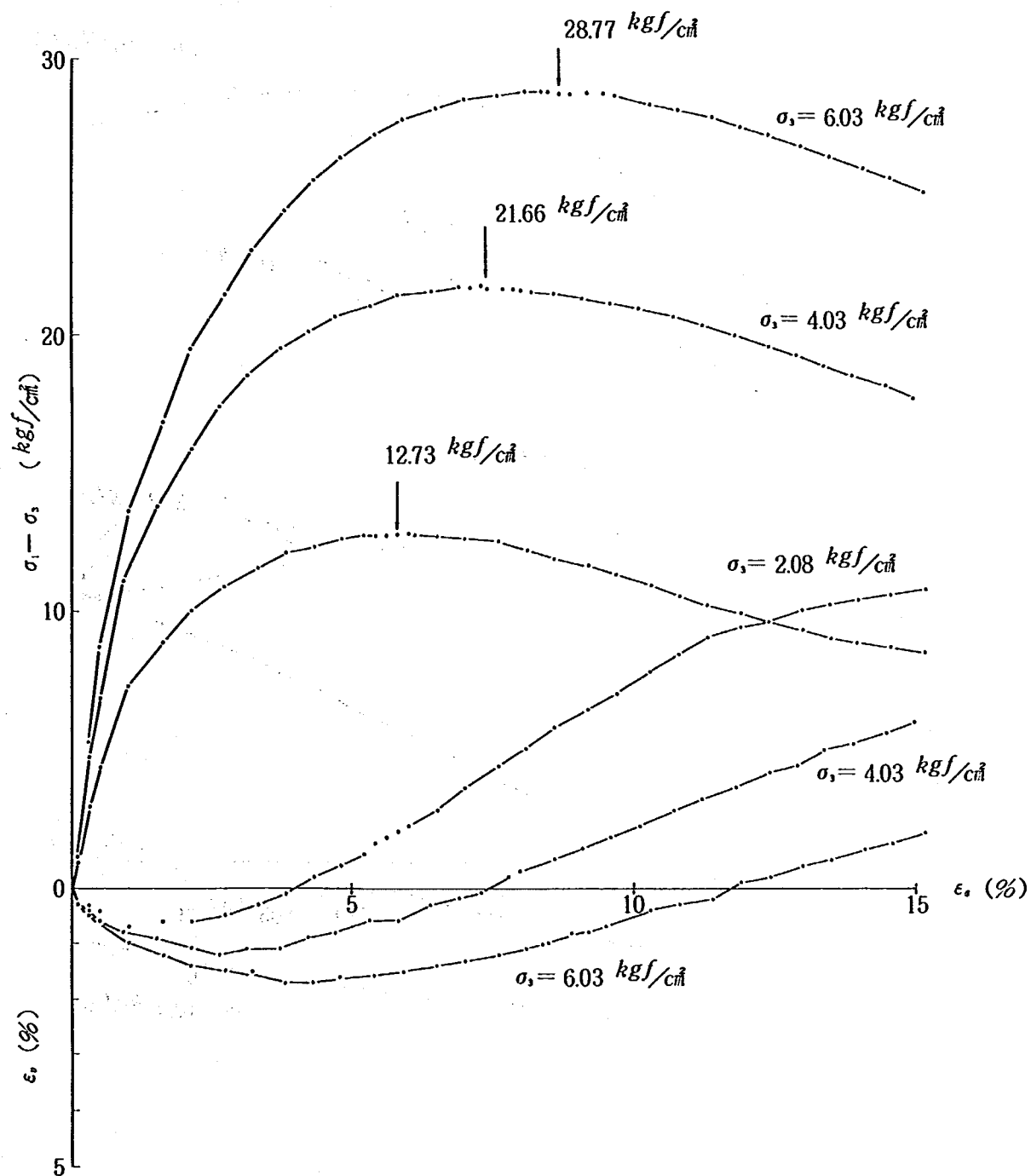


付図-13(2) 圧密経過時間と圧密体積変化量 (D30)

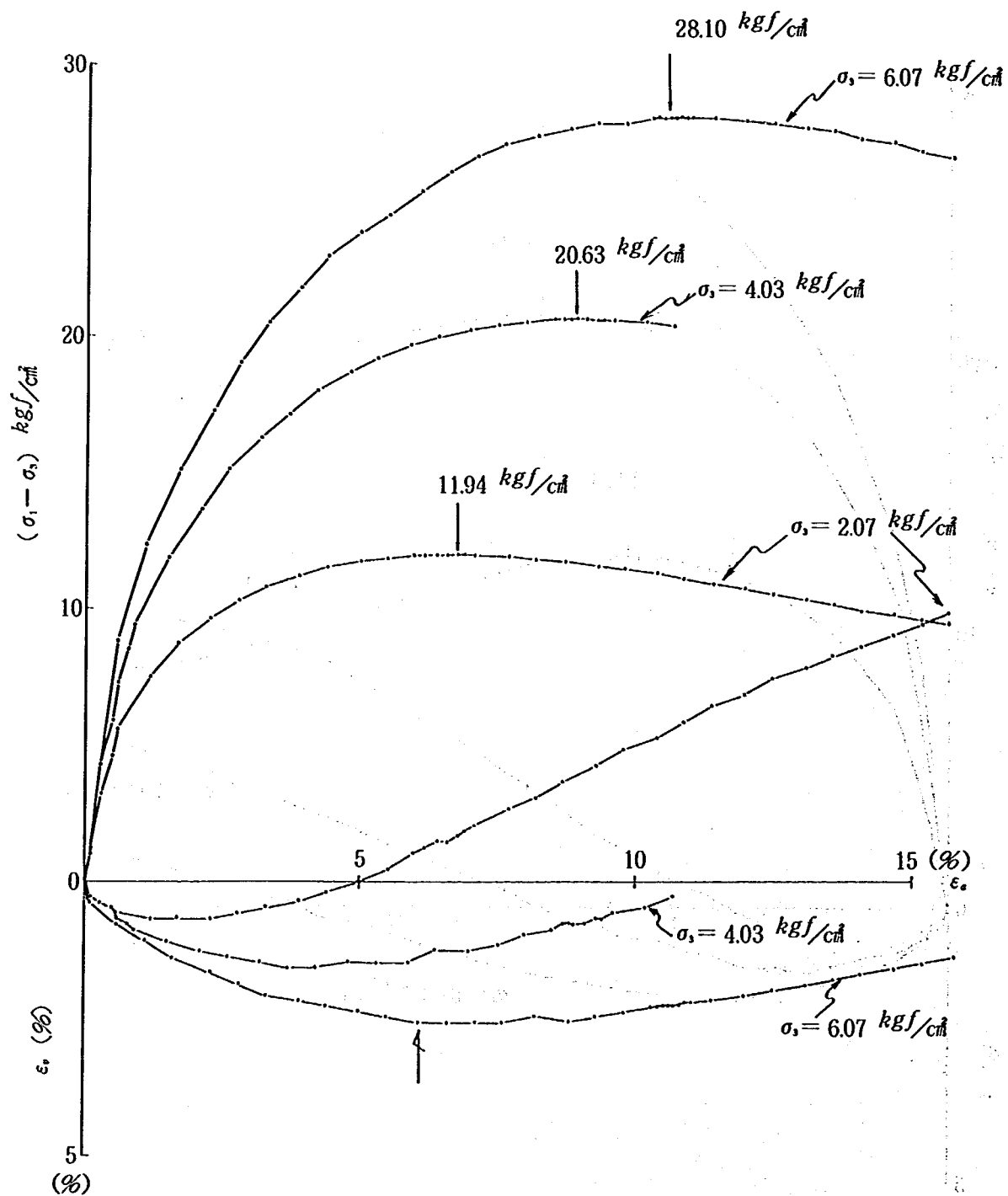


付図-13(3) 圧密経過時間と圧密体積変化量 (D30)

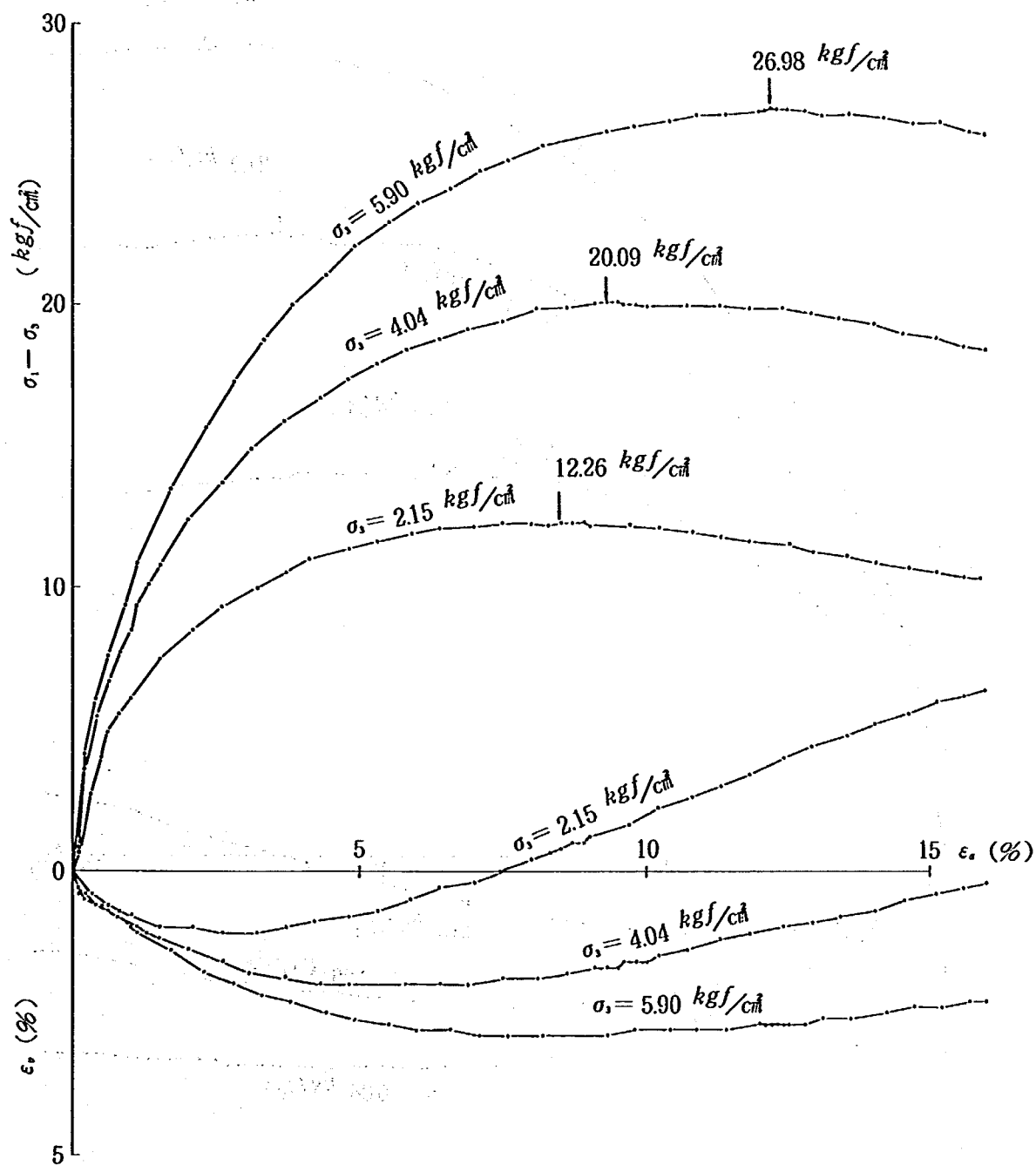




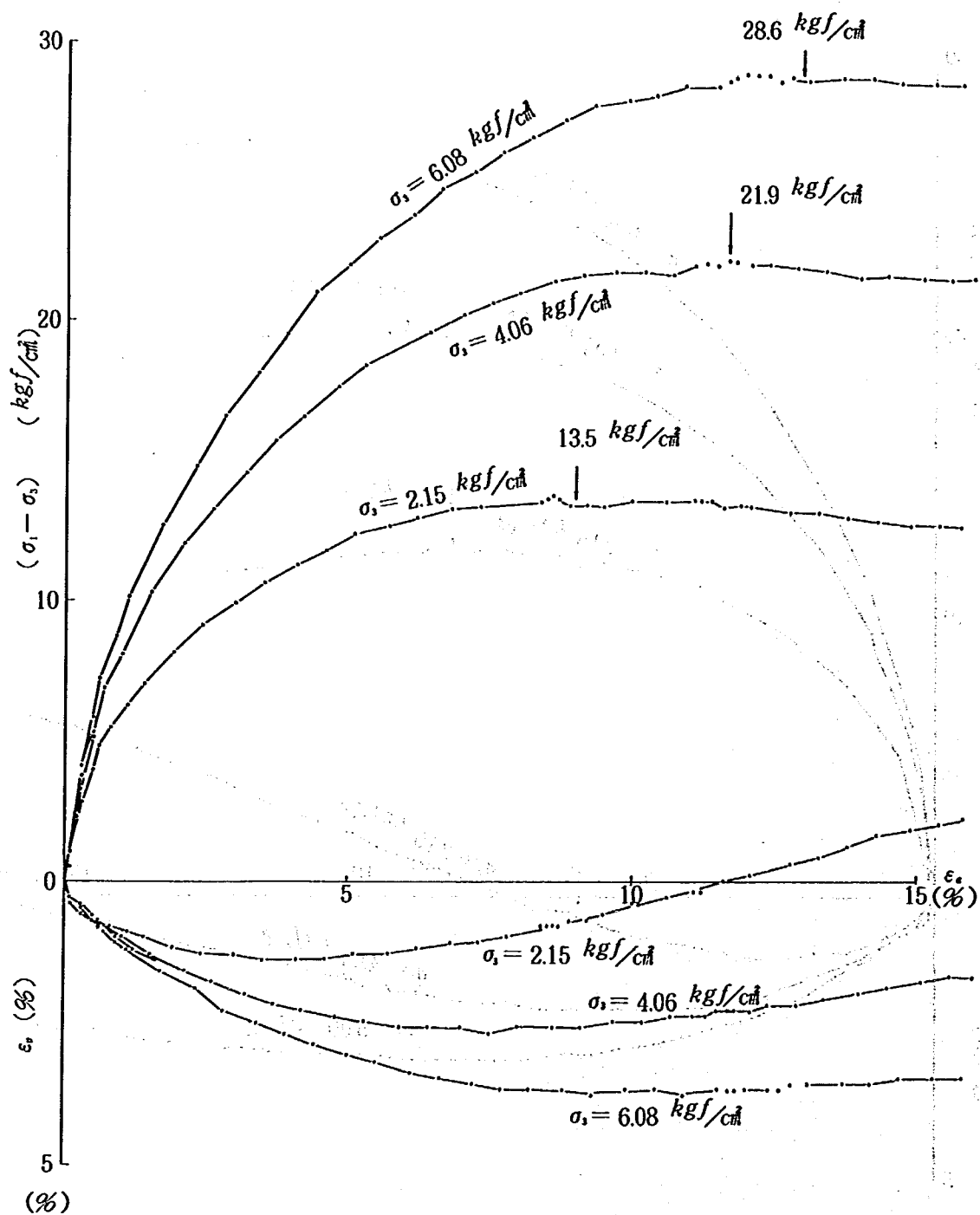
付図-14 応力-ひずみ曲線 (D10- ϵ_3 一定- $d_{\max} = 2.00\text{mm}$)



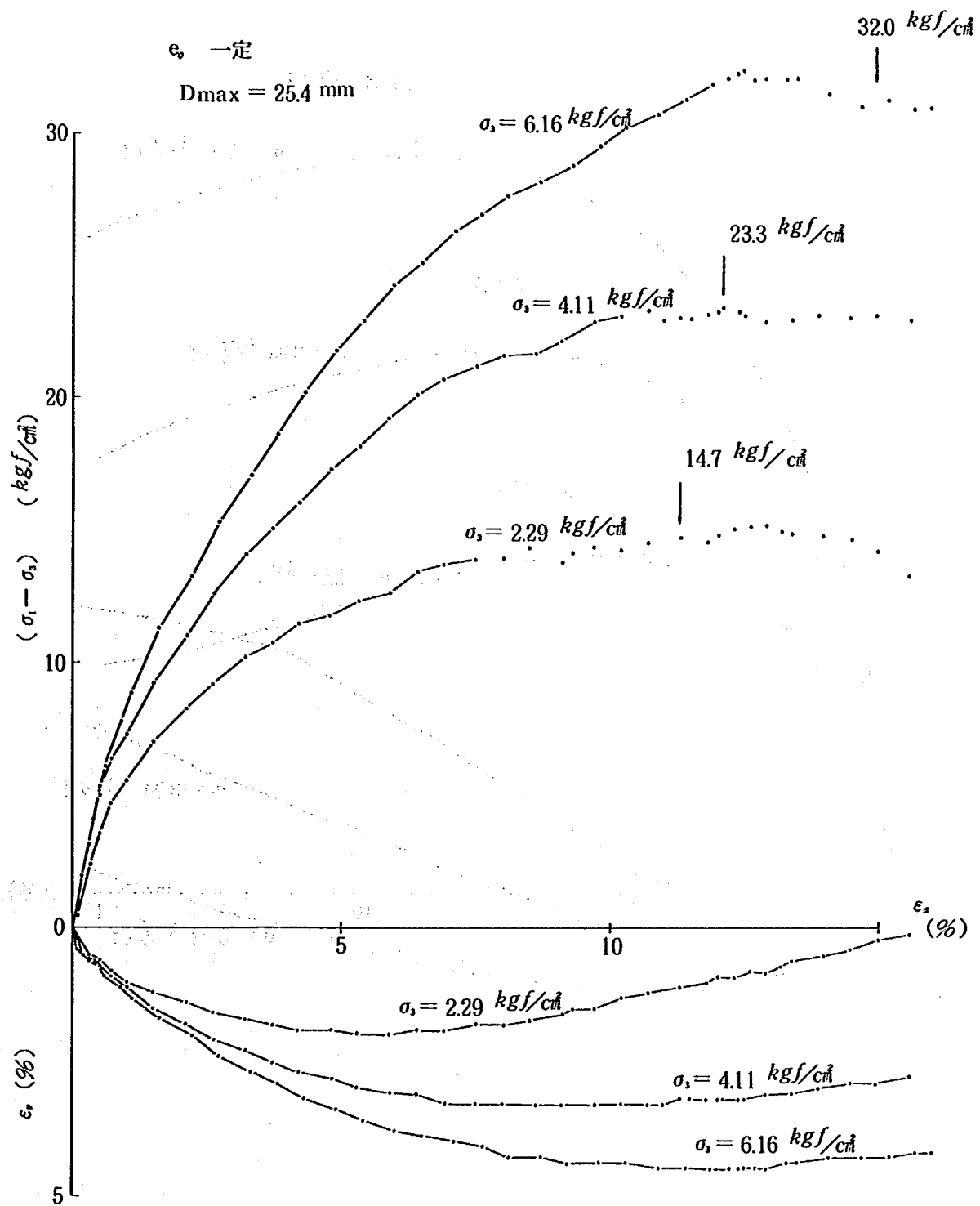
付図-15 応力-ひずみ曲線 (D10- ϵ_x 一定-dmax = 4.76 mm)



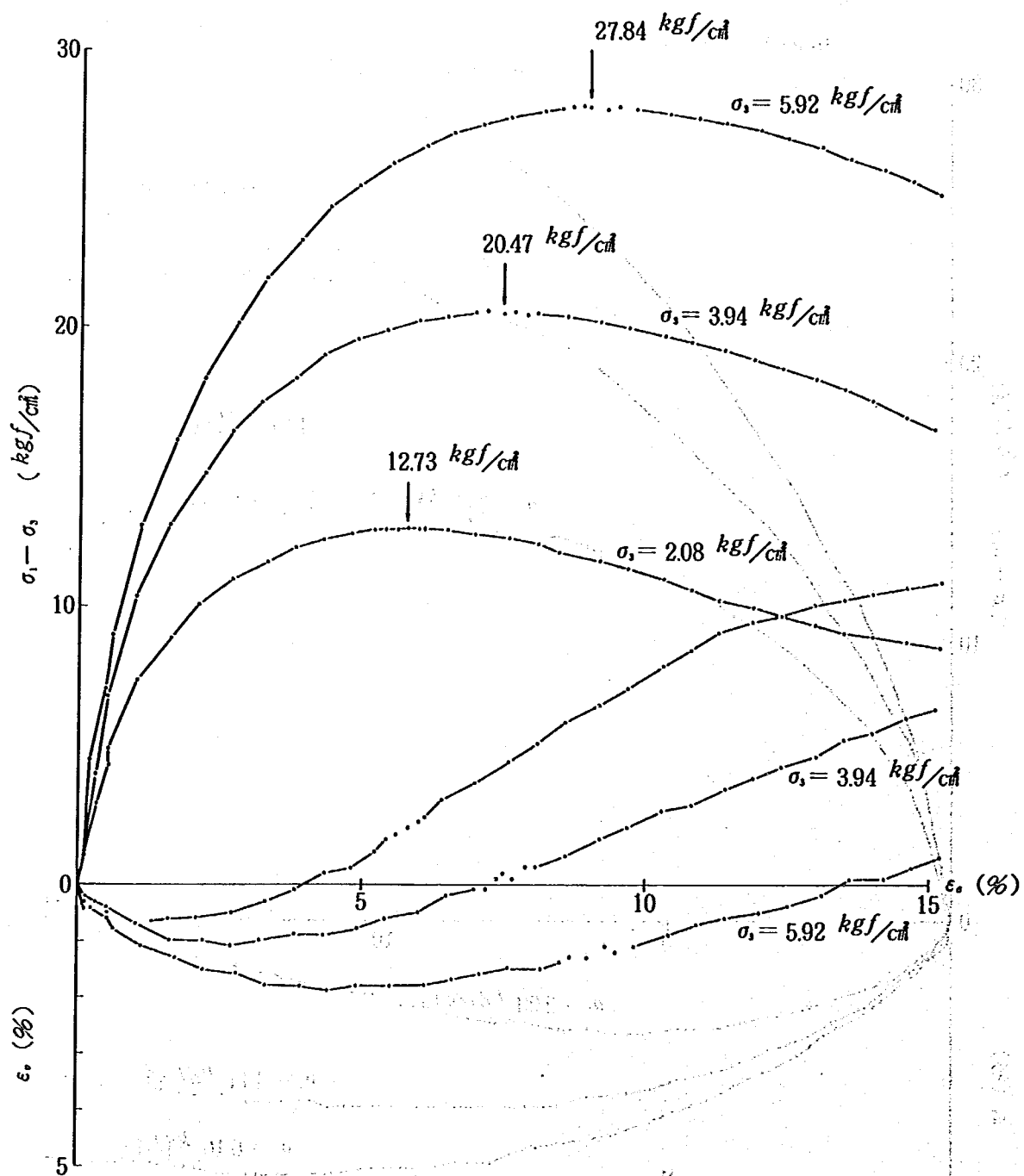
付図-16 応力-ひずみ曲線 (D10- e_0 一定- $d_{max} = 9.52$ mm)



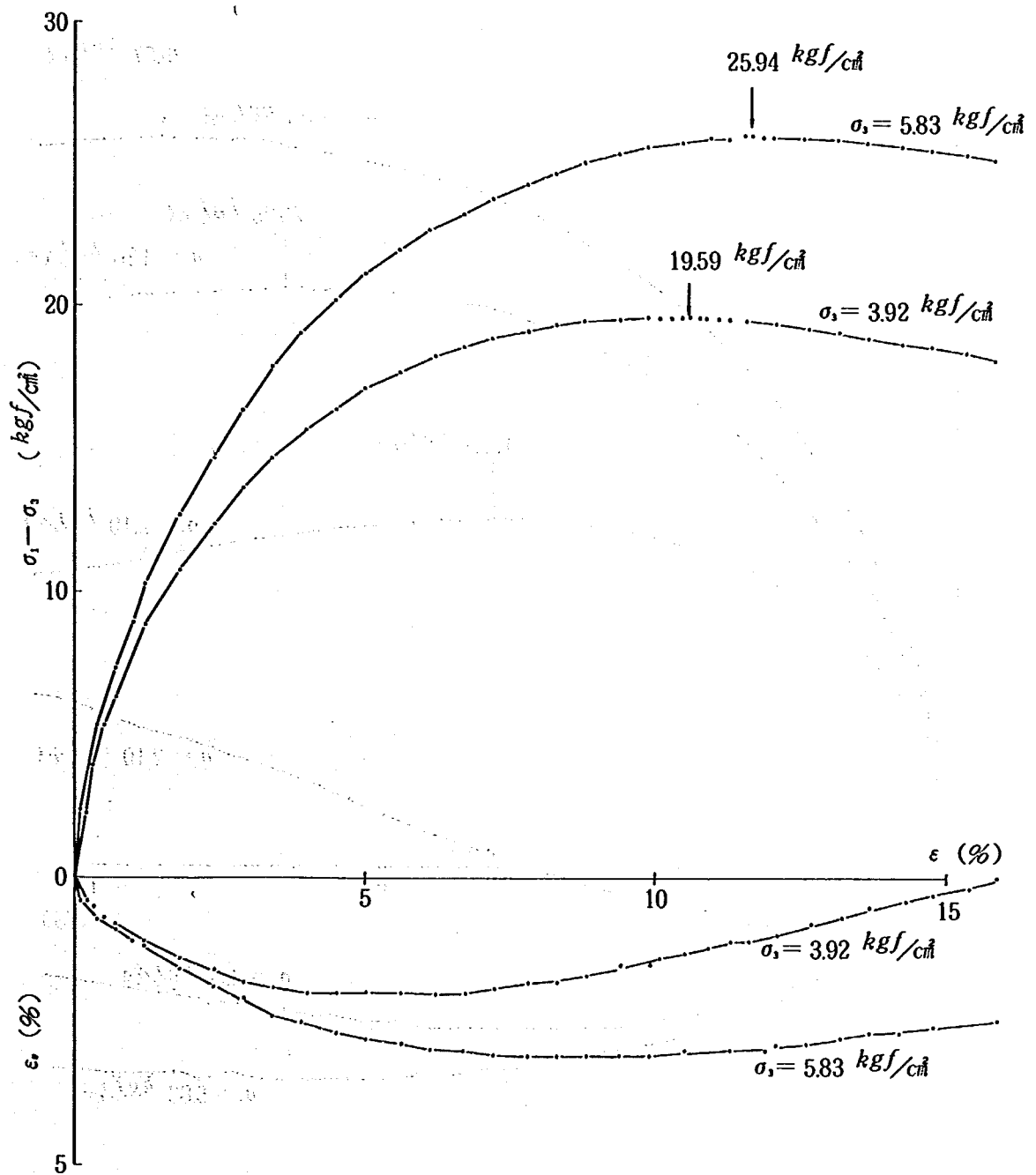
付図-17 応力-ひずみ曲線 (D10- ϵ_3 一定-dmax 19.1 mm)



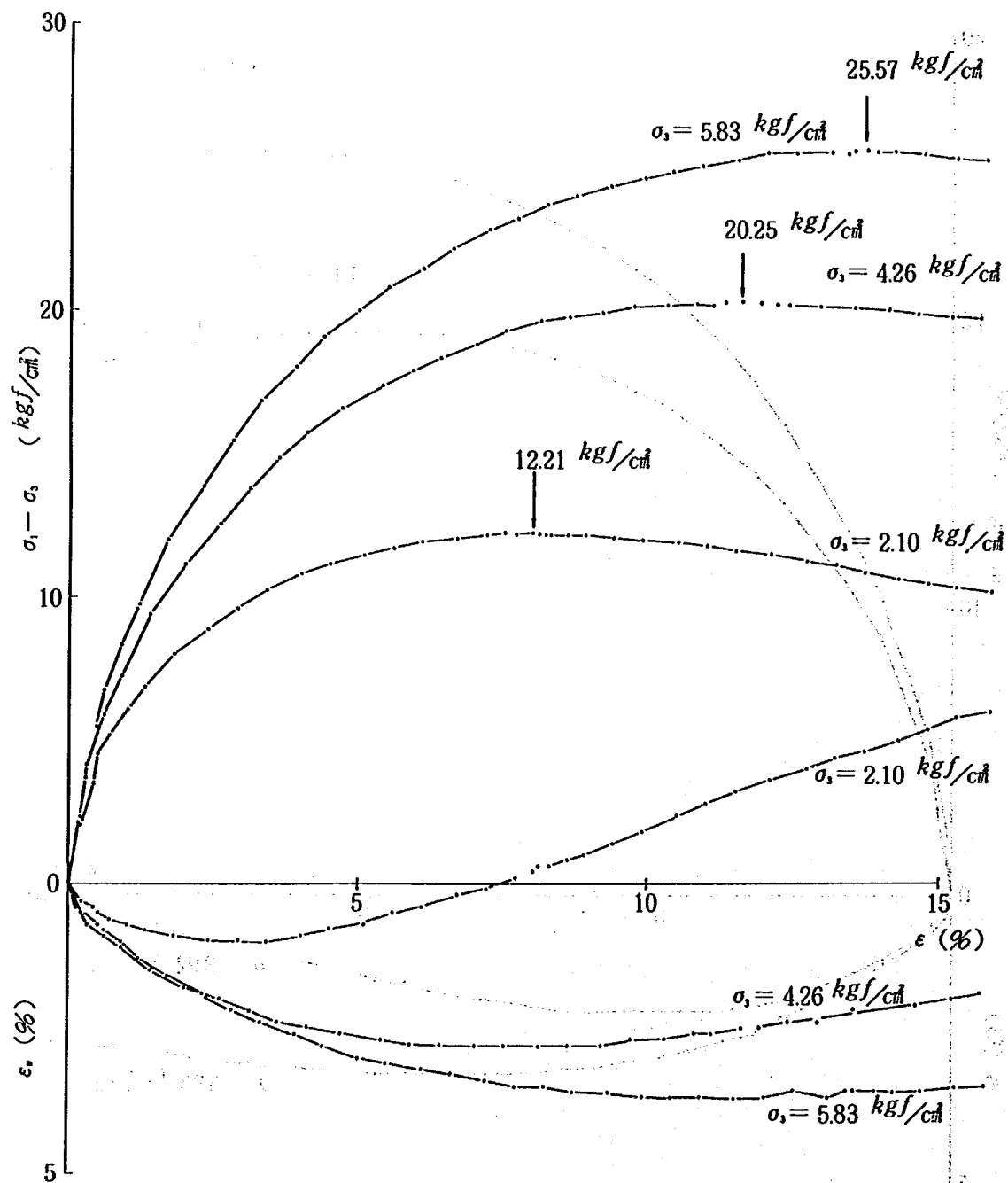
付図-18 応力-ひずみ曲線 (D10- e_0 一定- $d_{max} = 25.4 \text{ mm}$)



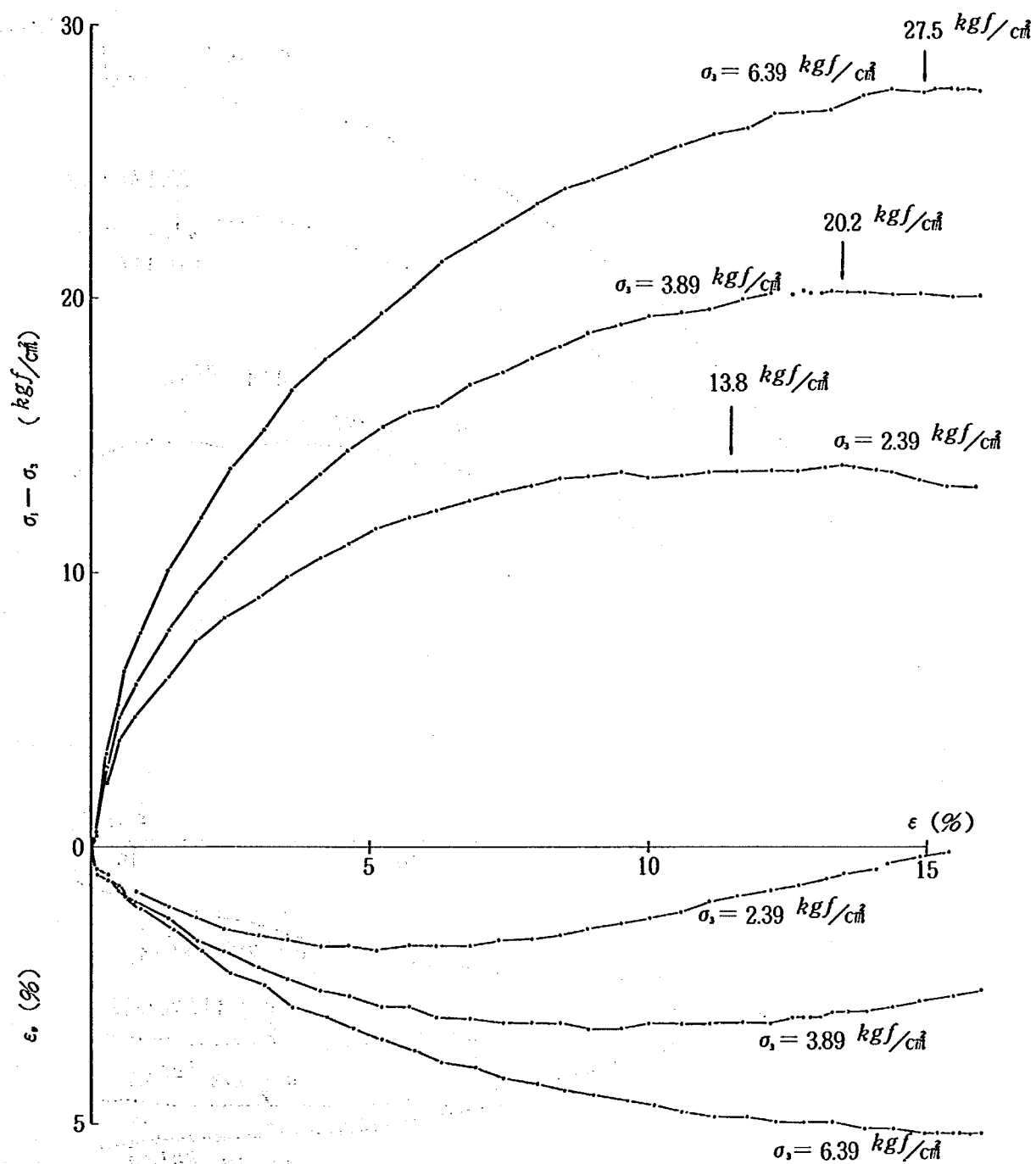
付図-19 応力-ひずみ曲線 (D10- e_c 一定- $d_{\max} = 2.00 \text{ mm}$)



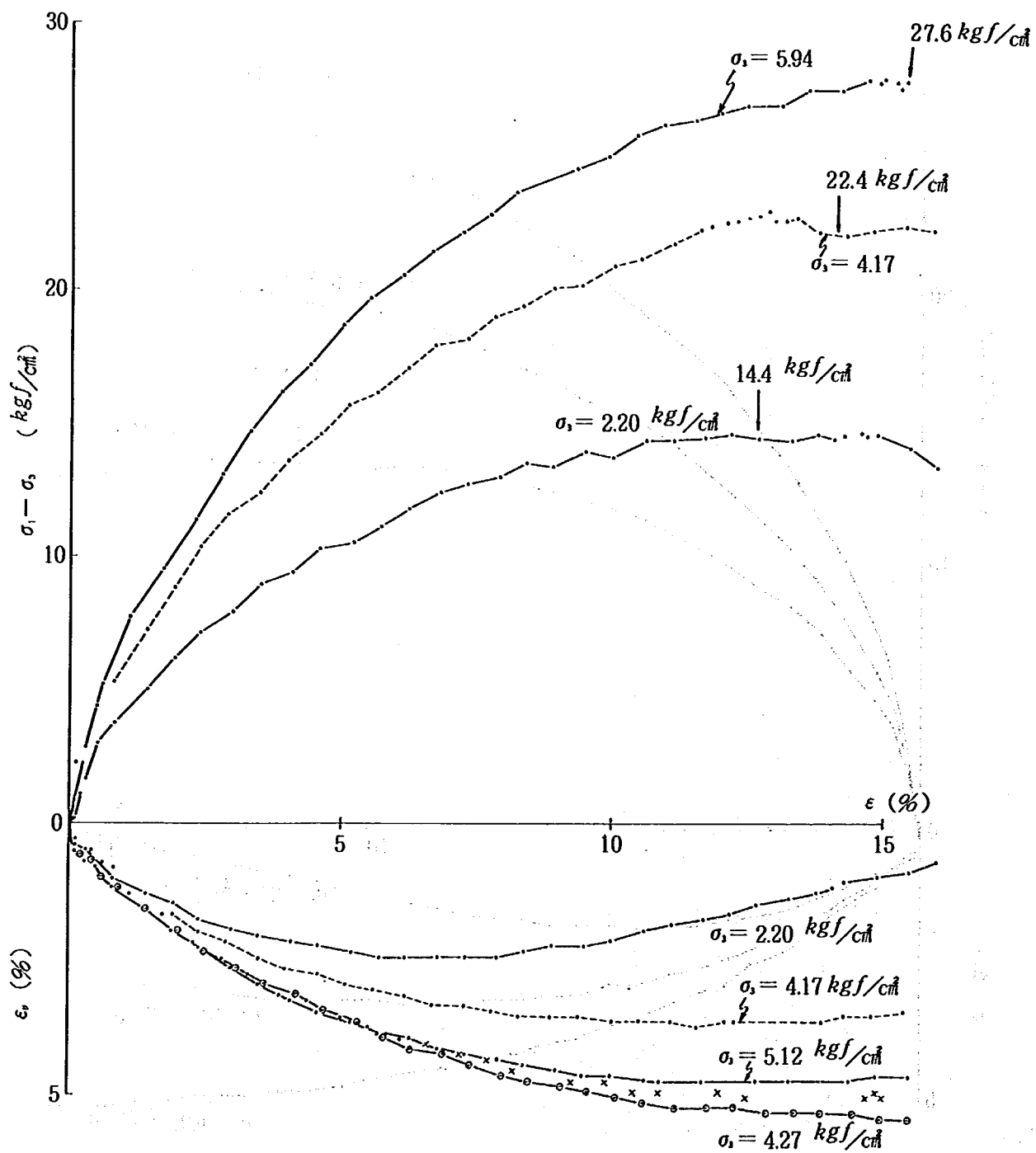
付図-20 応力-ひずみ曲線 (D10- e_c 一定- $d_{\max} = 4.76 \text{ mm}$)



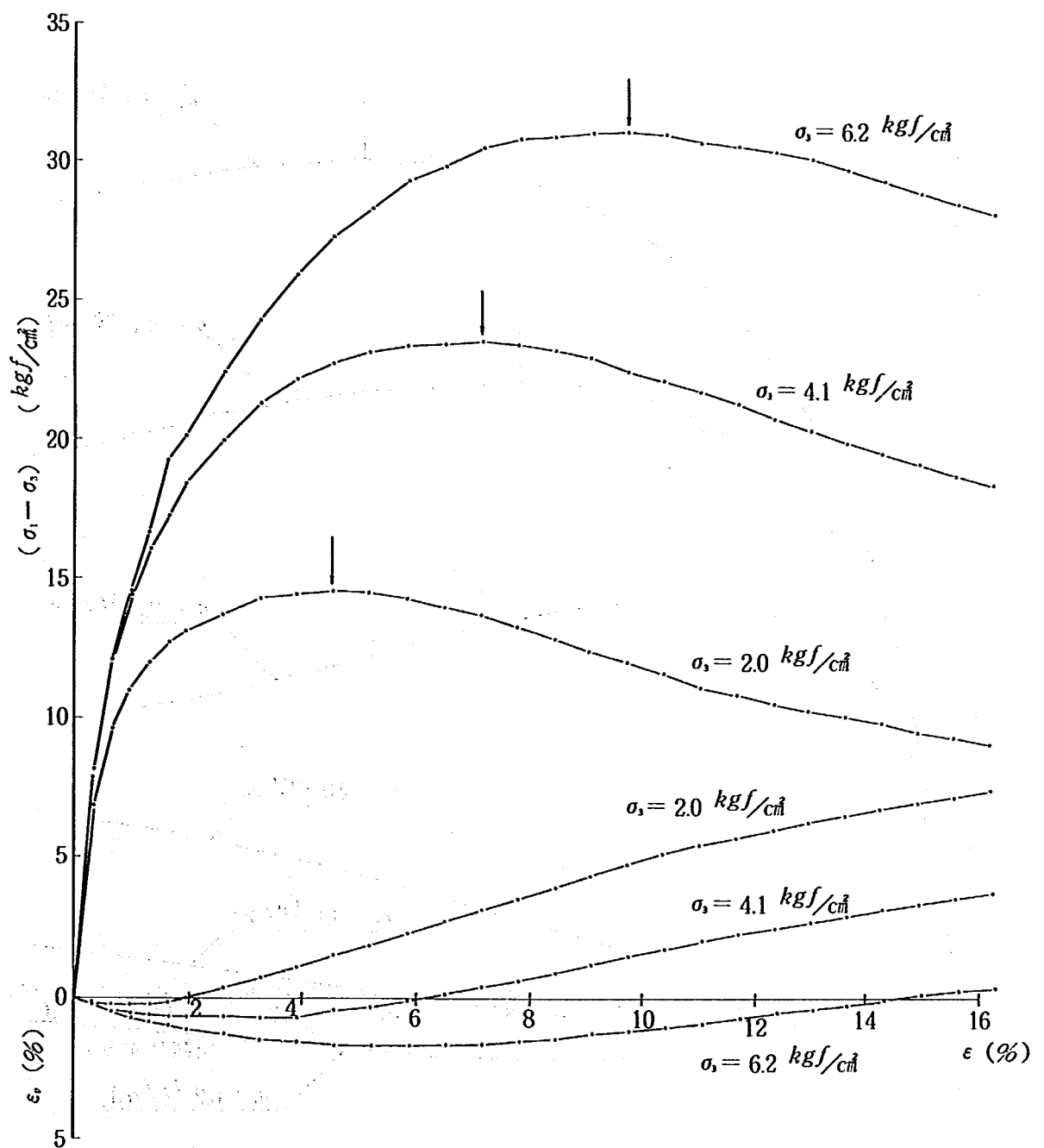
付図-21 応力-ひずみ曲線 (D10- ϵ_c 一定, $d_{max}=9.52$ mm)



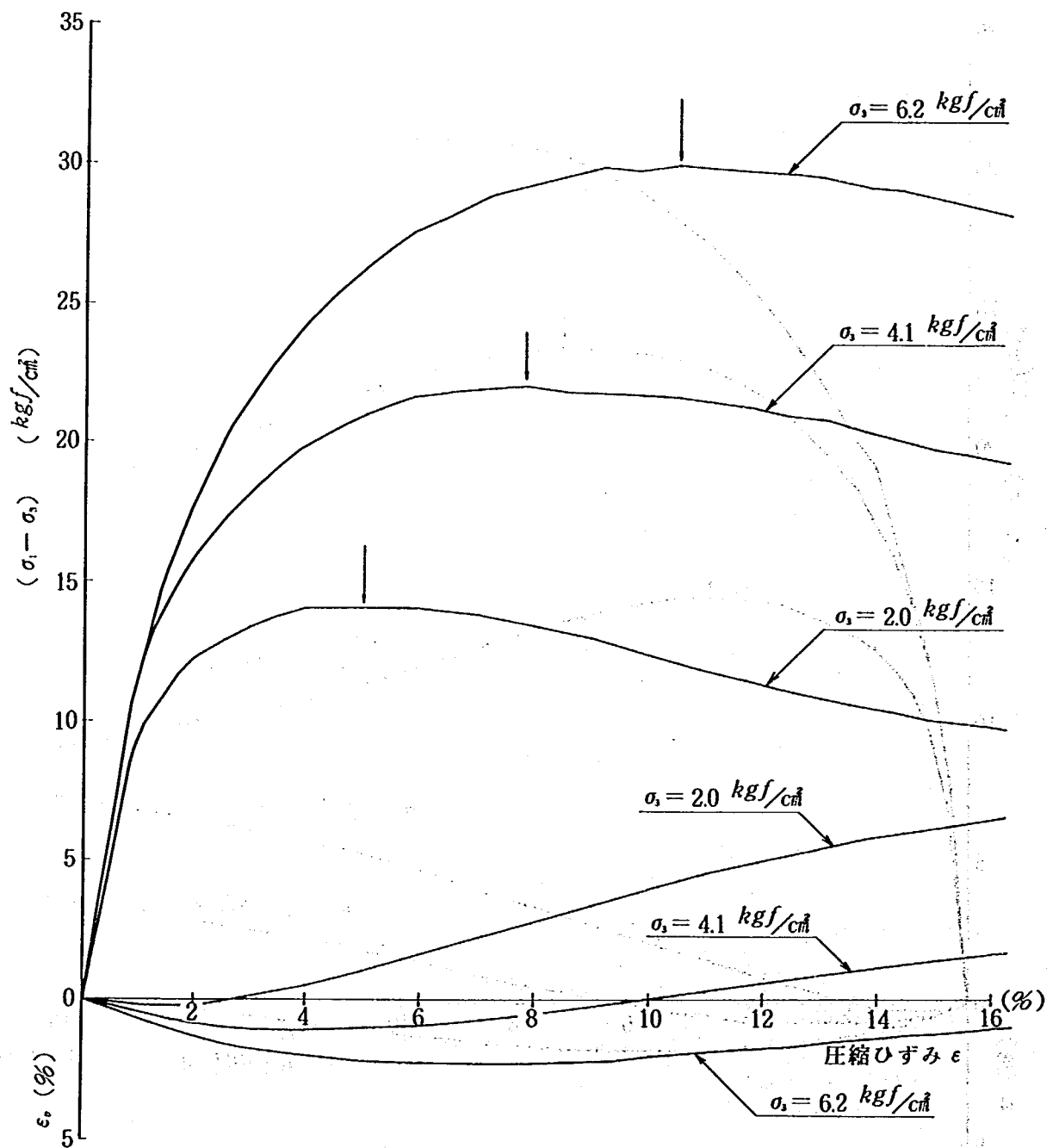
付図-22 応力-ひずみ曲線 (D10- e_c 一定 - $d_{\max} = 19.1 \text{ mm}$)



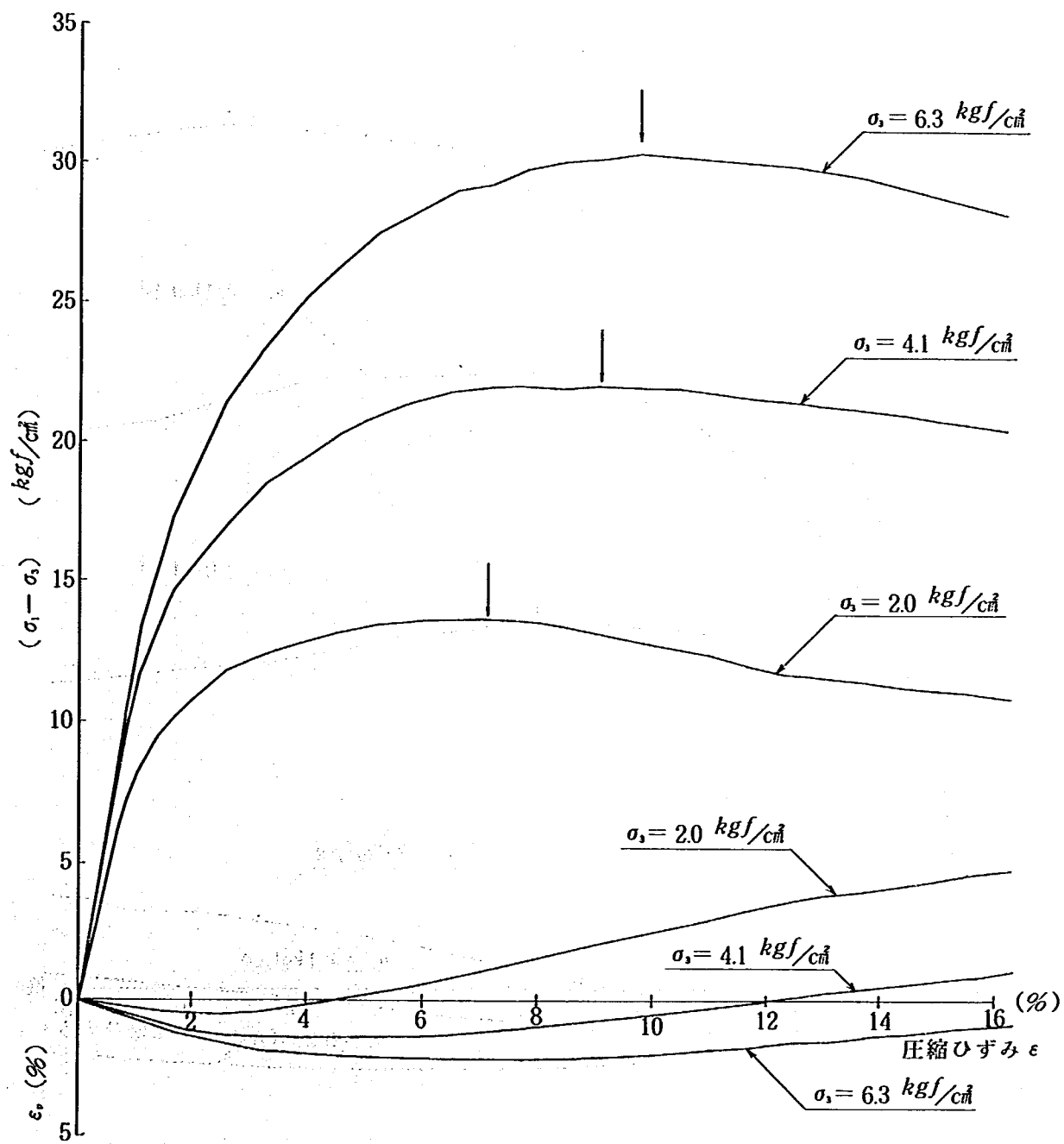
付図-23 応力-ひずみ曲線 (D10- σ_c 一定- $d_{\max} = 25.4 \text{ mm}$)



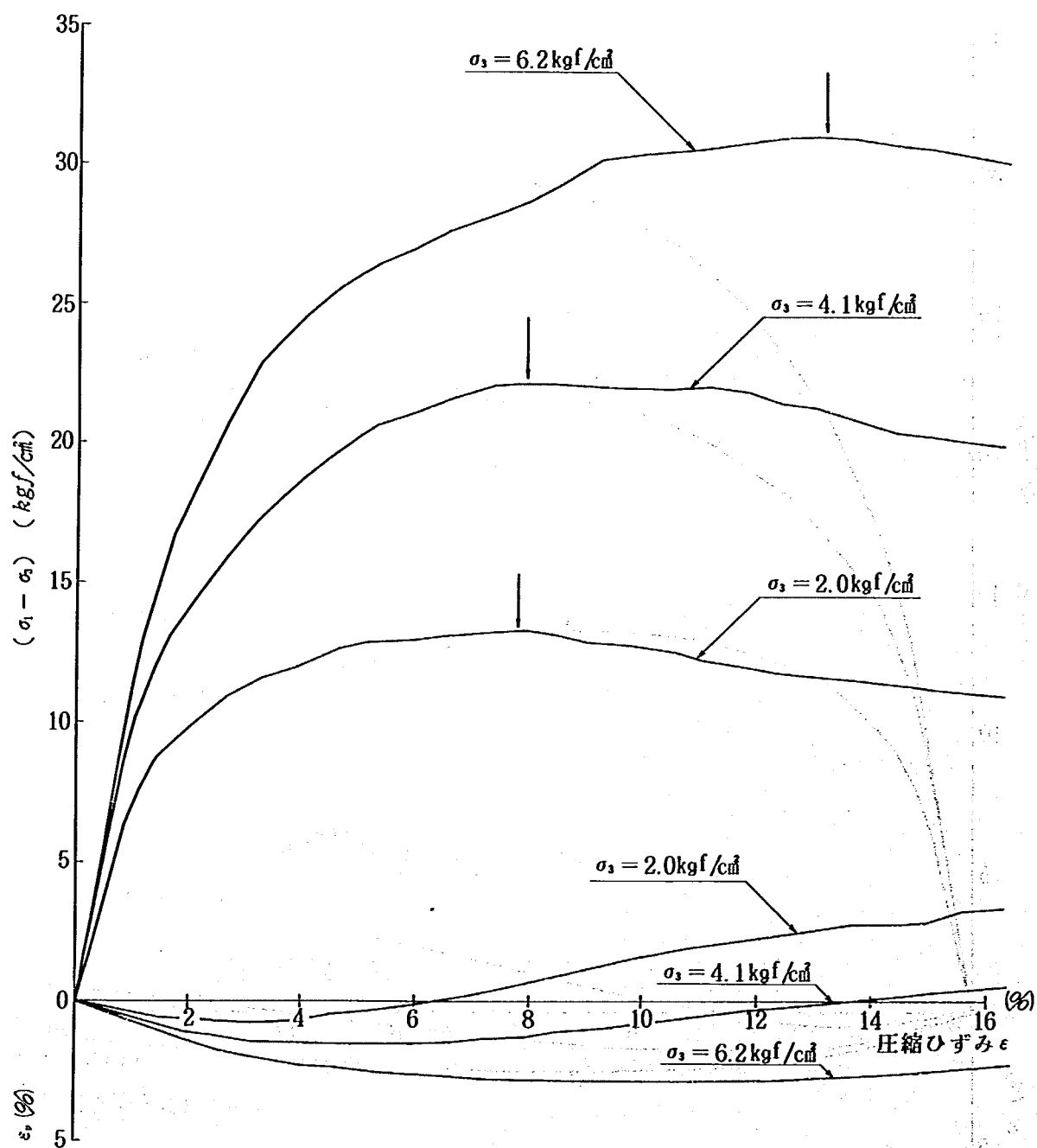
付図-24 応力-ひずみ曲線 (D30- e_c 一定- $d_{\max} = 9.52 \text{ mm}$)



付図-25 応力-ひずみ曲線 (D30- e_c 一定- $d_{max} = 19.1 \text{ mm}$)



付図-26 応力-ひずみ曲線 (D30- e_c 一定-dmax=38.1mm)



付図-27 応力-ひずみ曲線 (D30, e_c 一定 - $d_{\max} = 63.5 \text{ mm}$)

ロック材料の最大粒径に着目
した三軸圧縮比較試験・その2

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2006号
昭和58年6月(1983)
松本徳久・渡辺和夫
村上清基

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，せん断直前の供試体密度を統一した条件で供試体直径・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。



No.

配布先氏名

配布先住所



