

土 木 研 究 所 資 料

羽地ダムロック材料の材料試験報告

昭和60年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所
ダム部フィルダム研究室

羽地ダムロック材料の材料試験報告

フィルダム研究室 松 本 徳 久
渡 辺 和 夫
小 川 優

要旨

羽地ダムは、羽地川水系羽地大川（沖縄県名護市親川・田井等地先）に多目的ダムとして計画中の堤高が66.5mのロックフィルダムである。ロックフィルダム堤体の過半数以上はロック材料（粗粒材料）で構成されることから堤体に使用するロック材料の性質を知ることが基本的で重要なことである。

本試験では、材料として予定している砂岩と輝緑凝灰岩についてロック材料の判定を行う目的で物理試験・大型三軸圧縮試験を行った。輝緑凝灰岩については、材料の乾湿繰返し試験と長期載荷試験等の長期強度試験も行った。

砂岩は、絶乾比重 $\bar{G}_b$ が2.6、吸収率 $\bar{Q}$ が3%でせん断抵抗角 ϕ_d が38～44度の値を示し問題は無い。輝緑凝灰岩は、 $\bar{G}_b$ が2.8、 $\bar{Q}$ が2%であるが組成鉱物に粘土鉱物が少量含有しているため長期強度に若干問題が有る。また、飽和状態ではせん断抵抗角が3度ほど低下する結果が得られた。

キーワード：フィルダム，ロック材料，大型三軸圧縮試験，長期強度，乾湿繰返し，羽地ダム

羽地ダムロック材料の材料試験報告

建設省土木研究所フィルダム研究室

松 本 徳 久
渡 辺 和 夫
小 川 優

目 次

1. まえがき	1
2. 試験目的	5
3. 試験方法	7
3.1 搬入時材料のフルイ分け	8
3.2 物理試験	8
3.3 試験粒度分布の決定および試料調整	8
3.4 締固め試験	10
3.5 長期載荷試験および乾湿繰返し試験	11
3.6 変水位透水試験	14
3.7 大型三軸圧縮試験	15
3.8 試験後粒子破碎の調査	17
3.9 粒子形状および点載荷圧裂試験	17
3.10 X線分析	18
4. 試験結果	19
4.1 物理試験	19
4.2 締固め試験	23
4.3 大型三軸圧縮試験	34
4.3.1 砂岩	34
4.3.2 輝緑凝灰岩	57
4.4 長期載荷試験および乾湿繰返し試験	77
4.5 粒子形状・点載荷圧裂試験・X線分析	83
5. まとめ	92

1. ま え が き

本報告は沖縄開発庁・沖縄総合事務局・北部ダム事務所の依頼により、羽地ダム築堤予定材料であるロック材料（昭和 57 年度と昭和 58 年度に搬入の砂岩，昭和 59 年度に搬入の輝緑凝灰岩の 2 岩種）について物理試験および大型三軸圧縮試験を実施した。昭和 59 年度搬入の輝緑凝灰岩（輝緑凝灰岩には泥質と砂質の二種類があるが今試験では強度的に比較して弱いとされている泥質・輝緑凝灰岩を使用した。以下輝緑凝灰岩という。）については前述の試験に耐久性を調べる試験を追加し結果を取りまとめ報告するものである。

羽地ダムは、羽地川水系・羽地大川（沖縄県名護市字田井等，親川地先）に，堤高：66.5m，堤頂長：203m，総貯水容量： $1.98 \times 10^7 \text{m}^3$ で洪水調節・流水機能の正常な維持・かんがい・水道用水を目的としたロックフィルダムとして建設中のダムである。なお，ダム流域図・ダム平面図・ダム標準断面図・ダム貯水容量配分図を図－1.1～1.4に，ダム貯水池諸元を表－1.1に示す。

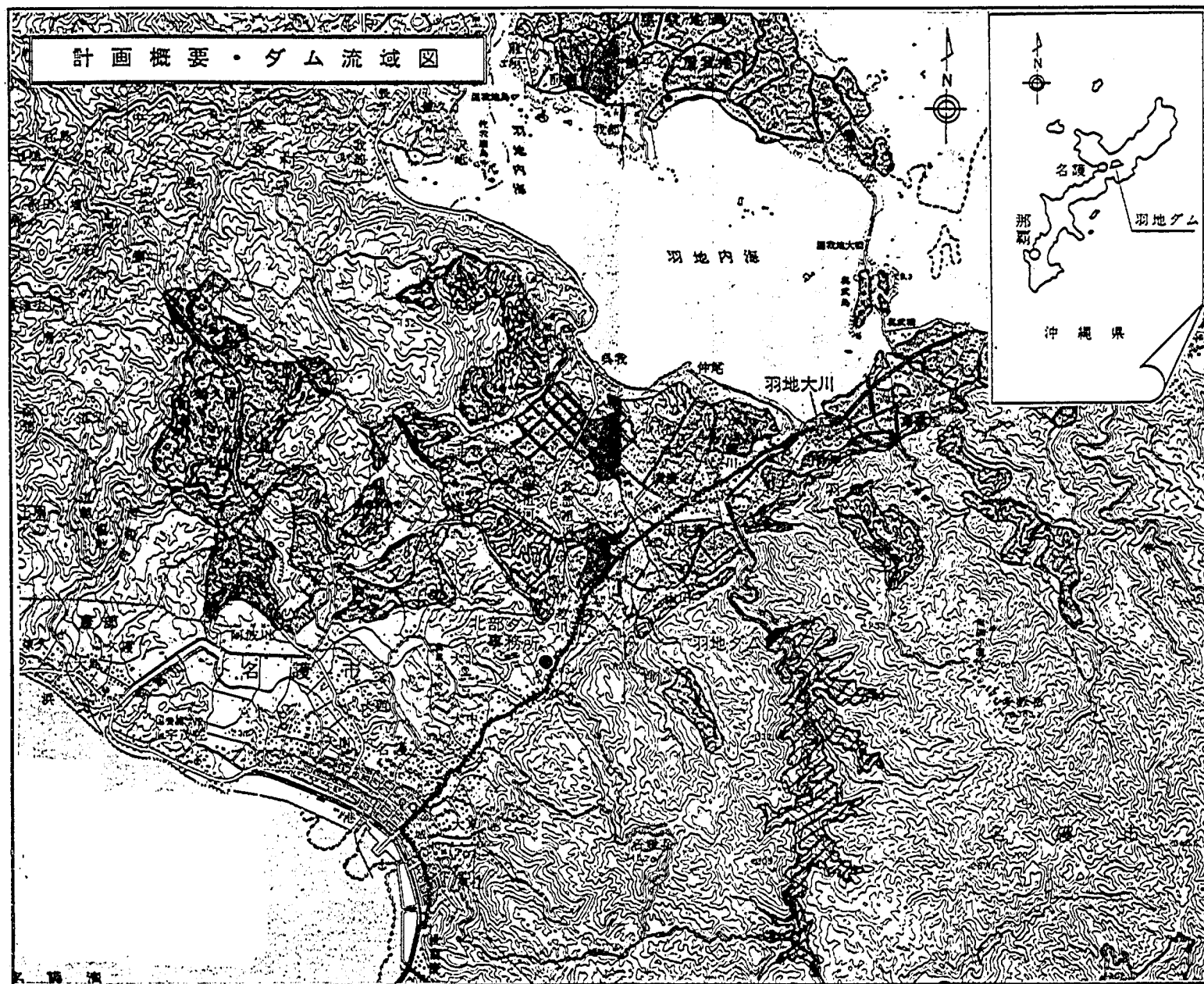


図1-1 ダム流域図

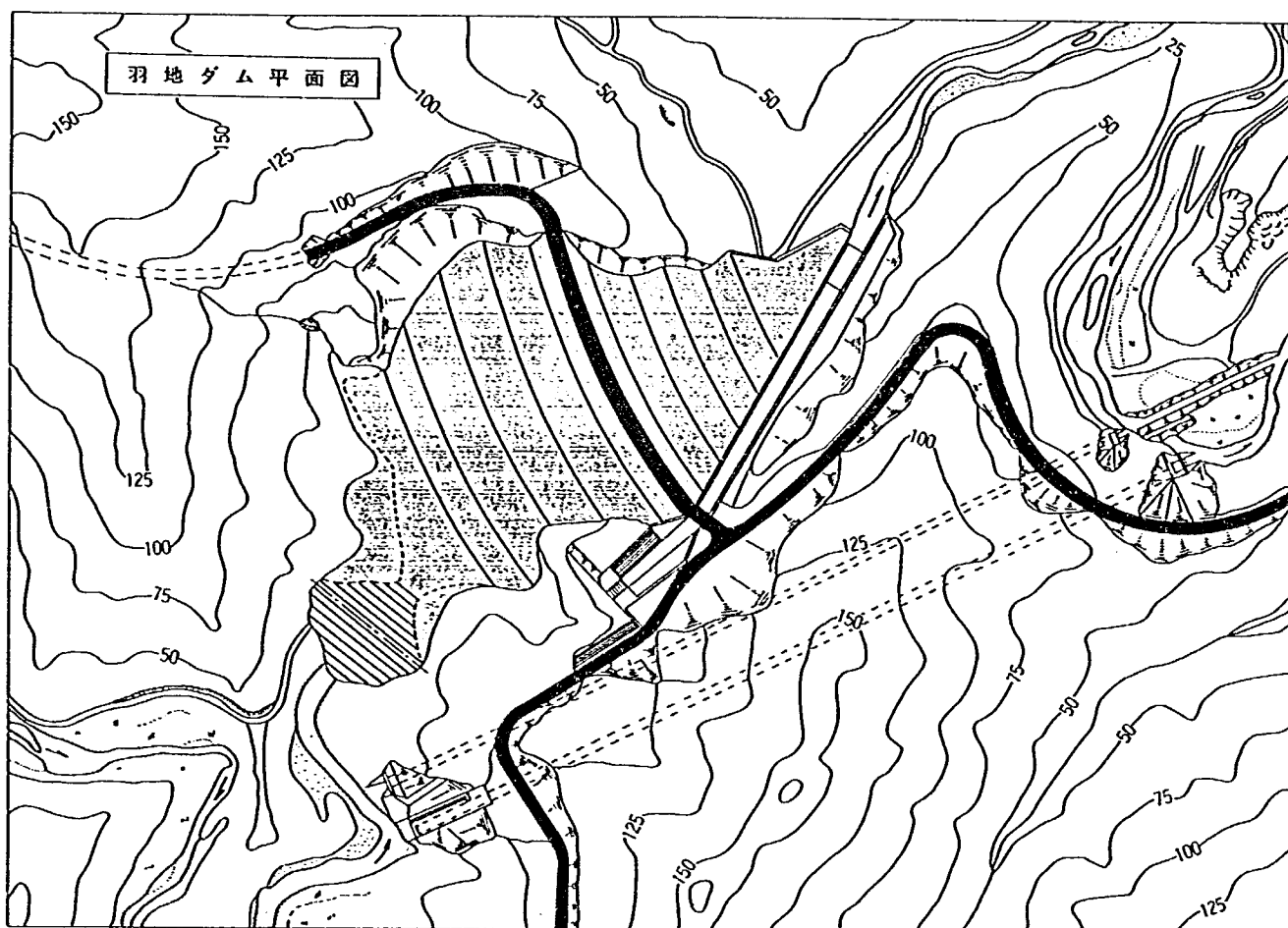


図-1.2 ダム平面図

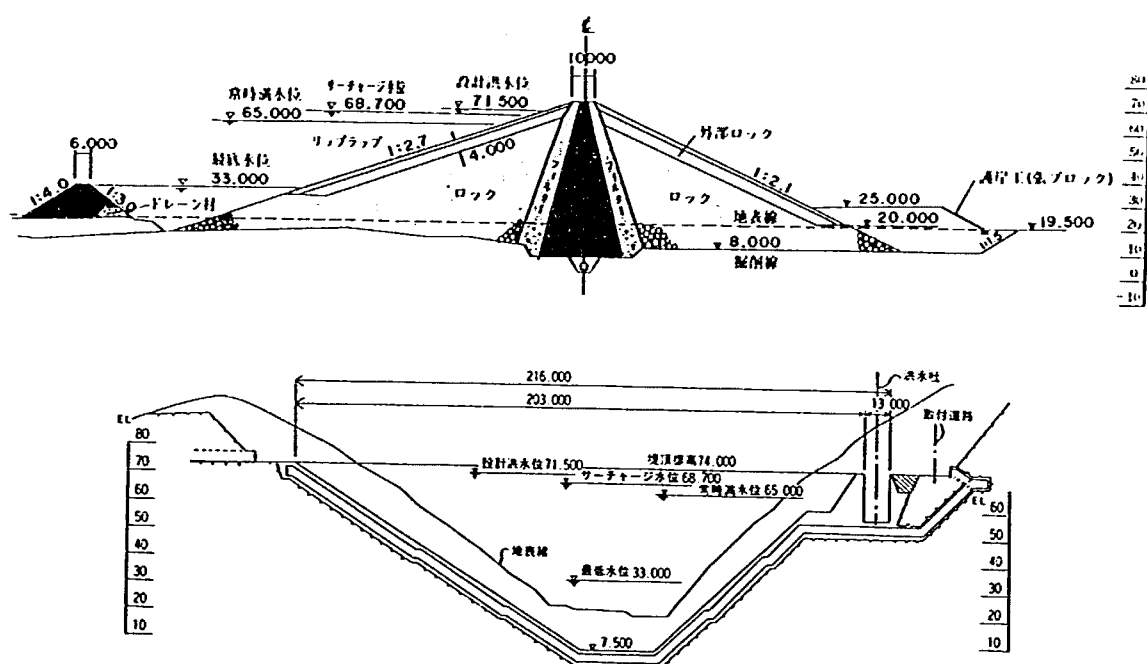


図-1.3 ダム標準断面図

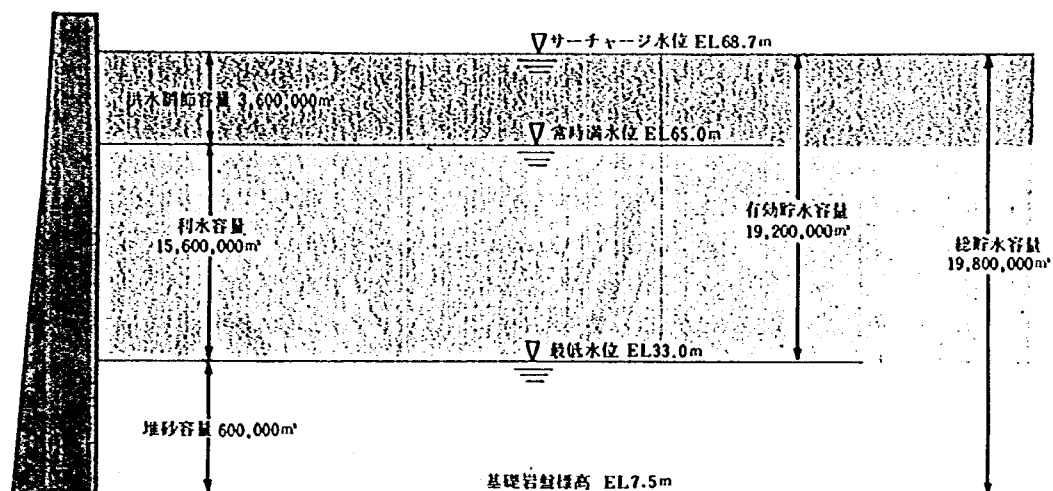


図 1 - 4 ダム貯水容量配分図

表 - 1. 1 ダム貯水池諸元

位 置	沖縄県名護市字田井等，親川地先			
型 式	ロックフィルダム			
堤 高	66.5 m	総 貯 水 容 量	19,800,000 m ³	
堤 頂 長	203 m	有 効 貯 水 容 量	19,200,000 m ³	
堤 体 積	約 1,000,000 m ³	常 時 満 水 位	EL. 65.0 m	
集 水 面 積	10.9 km ²	サーチャージ水位	EL. 68.7 m	
湛 水 面 積	1.15 km ²	設 計 洪 水 位	EL. 71.5 m	
非越流部標高	EL. 73.5 m	堤 頂 標 高	EL. 74.0 m	

2. 試験目的

羽地ダムの堤体積は約100万 m^3 であり、そのうちロックゾーンの堤体積は約76万 m^3 を占める。現在、北部ダム事務所の計画によるとロックゾーンに砂岩と輝緑凝灰岩の2岩種の使用を予定している。また、輝緑凝灰岩は若干変質が認められるためロックゾーンの内部(約59万 m^3)に、砂岩を外部(約17万 m^3)ロック材料として使用する計画である。

本試験では、ロック材料としての適性判断を行うために基本的な物理的性質および長期強度特性(輝緑凝灰岩のみ)を求める。また、合わせて力学的性質を求める試験を実施して、堤体材料として使用可能な材料についてはロックゾーンの設計値(密度・せん断抵抗角)について検討を加えることを主目的とした。

試料は、北部ダム事務所が各々の原石山より採取して土木研究所フィルダム研究室の実験室に搬入されたものであり、事務所によれば以下のように分類されている。

① 昭和57年度搬入試料 砂岩：砂岩Ⅰ(C_L 級)

② 昭和58年度搬入試料 砂岩：砂岩Ⅱ(C_M 級)

①・②の試料は、平南地区の原石山横坑(ST-1)内の深度13.5~14.5m地点から採取されたものである。

③ 昭和59年度搬入試料 輝緑凝灰岩： C_M 級

③の試料は、田井等地区(R-1)の原石山(EL40m・深度7~10m)より採取されたものである。

図-2.1に原石山の平面位置および輝緑凝灰岩の採取位置の詳細を示す。

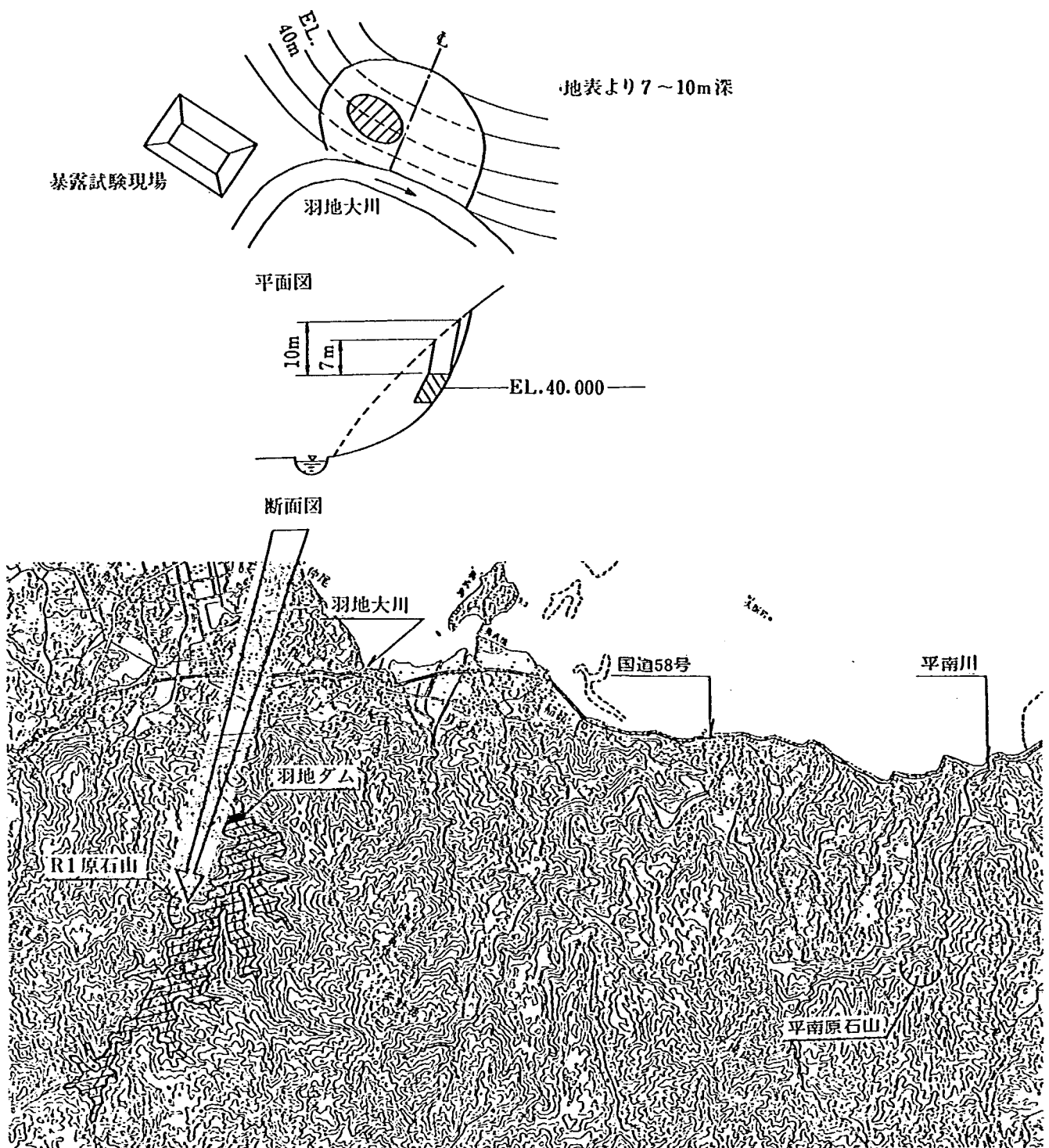


図-2.1 原石山平面図

3. 試験方法

試験項目・順序を図-3.1(1)・(2)の試験概要説明図に示す。

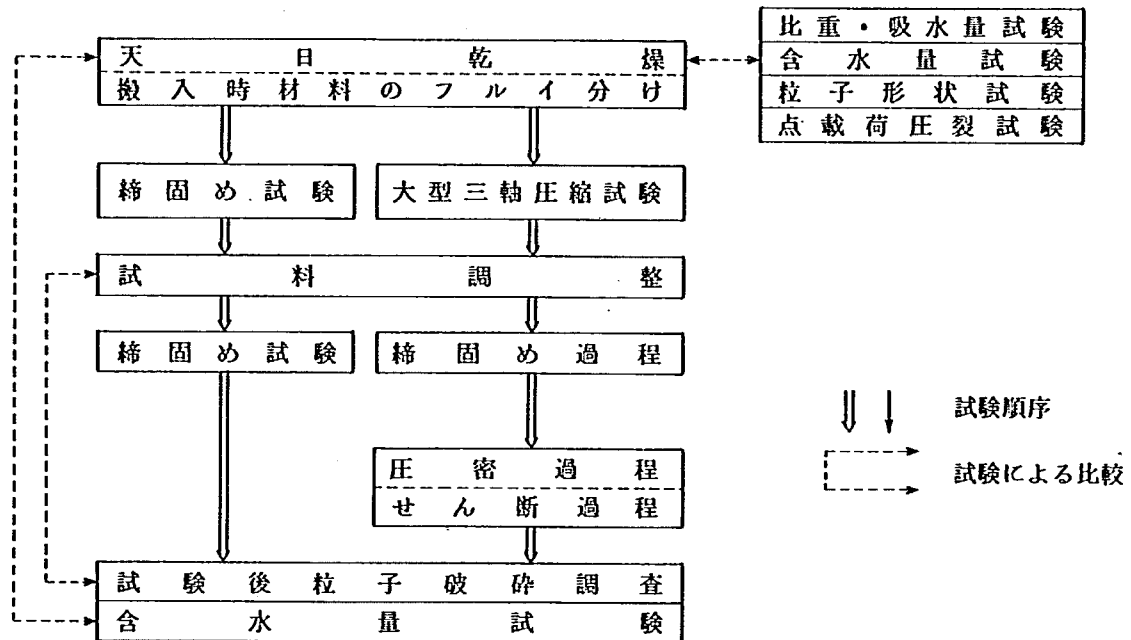


図3.1(1) 試験概要説明図(砂岩)

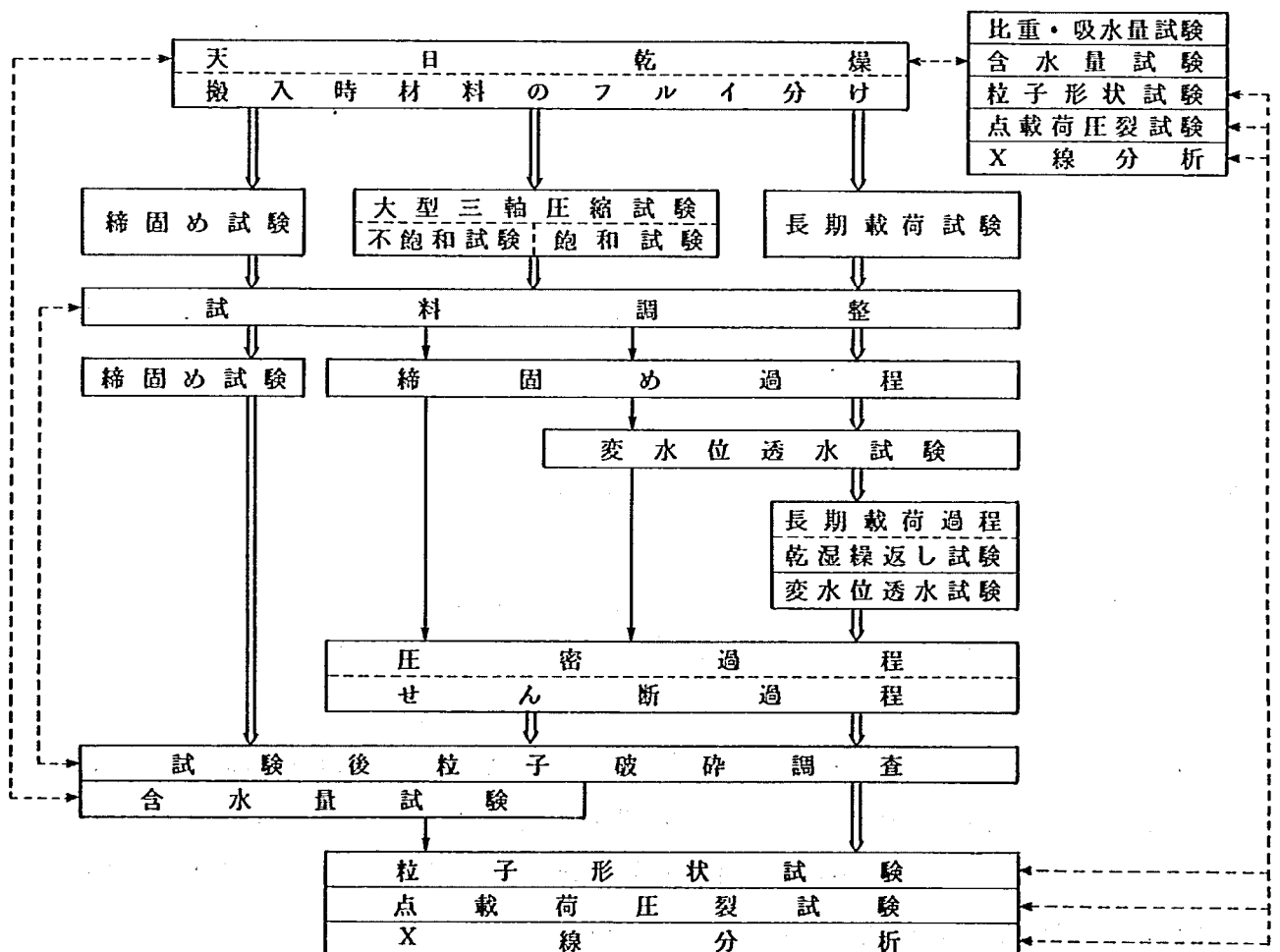


図-3.1(2) 試験概要説明図(輝緑凝灰岩)

砂岩で実施する試験を基本とし（搬入時材料のフルイ分け・物理試験・試験粒度分布の決定および試料調整・締固め試験・大型三軸圧縮試験・試験後粒子破砕の調整・粒子形状および点載荷圧裂試験）、輝緑凝灰岩では通常実施する試験の他に、長期載荷試験および乾湿繰返し試験・変水位透水試験・大型三軸圧縮試験（飽和試験）・X線分析を実施した。

3.1 搬入時材料のフルイ分け（砂岩・輝緑凝灰岩）

試験を実施するに先立ち現場より搬入された材料を JIS・A・1204 により粒径 63.5 ～ 0.074 mm までの 10 粒径階に分級し、それに並行させて天日乾燥により含水比 (w) を 1 % 以下にした。

3.2 物理試験（砂岩・輝緑凝灰岩）

比重・吸水量試験は、粒径 4.76 mm 以上については粗骨材の比重および吸水量試験 JIS・A・1110 に準拠して実施し、水浸 48 時間以上・乾燥 24 時間以上とし以下に示す計算式により物性値を求めた。粒径 4.76 mm 以下については土粒子の比重試験 JIS・A・1202 に準拠して実施した。また、含水量試験は JIS・A・1203 に準拠して実施した。

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

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

$$\text{JIS・A・1202 に対応した比重} \quad G_g = \frac{A}{A - C}$$

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

A：絶乾重量 B：表乾重量 C：水中重量

3.3 試験粒度の決定および試料調整（砂岩・輝緑凝灰岩）

締固め試験および大型三軸圧縮試験に先立ち、現場での原石山採取粒度を当試験施設で試験が可能な粒度にする必要がある。そのためには供試体径 30 cm の三軸圧縮試験を基本として、試験最大粒径/供試体径が 1/5 以下（最大粒径が 63.5 mm）を試験時試料の最大粒径とした。次に、横坑内採取試験粒度と相似条件の粒度曲線を作成し試験粒度とした。

砂岩 I・II については昭和 57 年度搬入材の現場での原石山採取粒度を考慮し、試験粒度曲線を作成した。試験粒度の均等係数は砂岩 I・II では $U_c = 9$ で統一し、輝緑凝灰岩では昭和 59 年度搬入材の現場での原石山採取粒度を考慮し $U_c = 22$ として試験を実施した。なお、図-3.2 に現場粒度分布図および試験粒度分布図を示す。

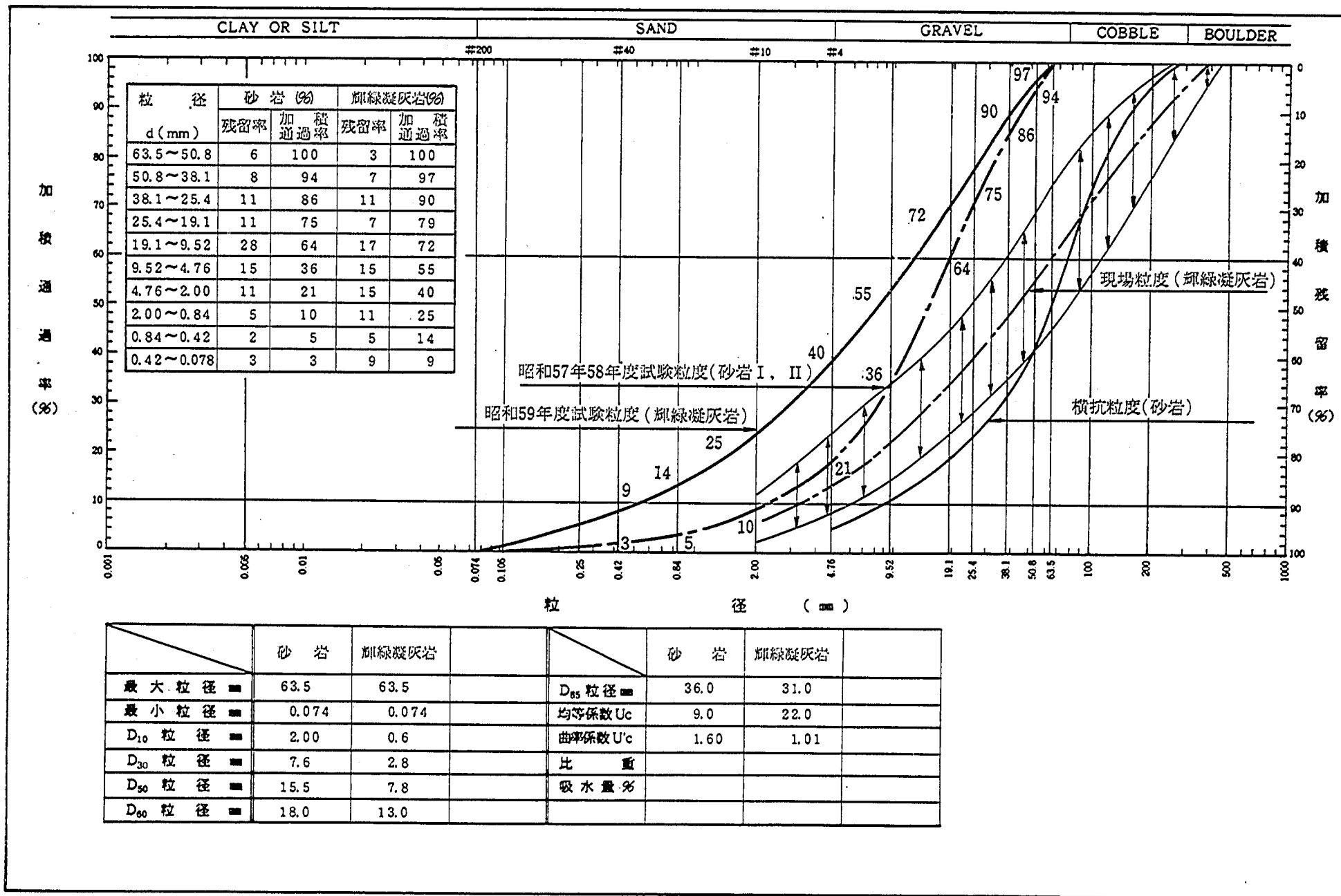


图-3.2 試驗粒度分布图

3.4 締固め試験（砂岩・輝緑凝灰岩）

締固め試験は、試料重量を絶乾状態でなるべく統一し、砂岩Ⅰで80kgf、砂岩Ⅱで78kgf、輝緑凝灰岩では79kgfとした。試料は試験粒度に従い重量配分し、6層に分け内径30cmモールド内に入れ、図-3.3および表-3.1に示す電気ランマー（自重33kgf、打撃数950回分、直径20cm）で締固めた。

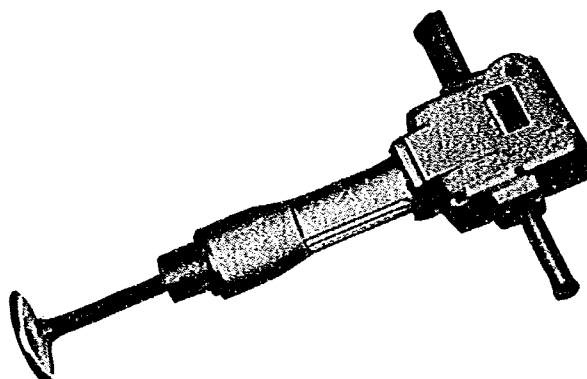


図-3.3 電動ランマー

表-3.1 締固め試験装置の仕様

項 目	仕 様
名 称	日立電気ハンマー PH-85 型
使 用 電 源	単相交流 50/60 Hz 電圧 100 V 又は 200 V, 電流 14 A (100 V), 7 A (200 V)
全 負 荷 打 撃 数	毎分 950 回
電 動 機	保護形単相直巻整流子電動機
重 量	33 kgf

締固め時間の増加は0～50秒までの間に7～9試料実施した。また、三軸圧縮試験時の供試体密度は、締固め試験結果より定義した相対密度に対応した間隙比状態の密度とした。相対密度の定義およびケース名を表-3.2に示す。間隙比の値は下記に示す計算式によって求めた値としている。

$$e = \frac{\gamma_w \cdot G_b}{\gamma_d} - 1$$

γ_w : 1とする

γ_d : 乾燥密度

G_b : 平均比重（絶乾比重）

なお、締固めによる粒子の破碎状態についても調べた。締固め試験条件を表-3.3に示す。

表-3.2 相 対 密 度 表

相 対 密 度 D_r (%)	ケ ー ス 名
0 ~ 15	Very Loose (V・L)
15 ~ 35	Loose (L)
35 ~ 65	Medium (M)
65 ~ 85	Dense (D)
85 ~ 100	Very Dense (V・D)

 $e_{\max}$: 最大間隙比 $e_{\min}$: 最小間隙比 e : 目標間隙比

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

上述の()の記号は略語である。

表-3.3 締 固 め 試 験 条 件

項 目	試 験 条 件
絶 乾 重 量	78 kgf を基準
打 撃 数	150 打撃/分
載 荷 板 直 径	20 cm
層 数	6 層<1 層 約 10 cm>
供 試 体 寸 法	直径 30 × 高さ 60 cm
締固めエネルギー (締固め時間)	砂 岩 I — 0 (投入のみ)・3・7・10・20・30 秒 砂 岩 II — " ・2・4・10・20・30・40 秒 輝緑凝灰岩 — " ・1・5・10・20・30・40・50 秒

3.5 長期載荷試験および乾湿繰返し試験(輝緑凝灰岩)

長期載荷試験は、ロック材料盛立後におけるロック材料の集合体として、水の作用を受けることにより強度にどの程度影響が及ぶか把握するために実施した。試験は直径 30 × 高さ 60 cm の供試体を同じ密度状態に 2 本作成し、 $0.2 \cdot 0.6 \text{ kgf/cm}^2$ の拘束応力を常時載荷させた。載荷状態の供試体に飽和状態・自然排水状態をそれぞれ 48 時間ずつ 30 サイクル与えた。供試体の間隙比の変化をダイヤルゲージの沈下量および体積変化量より計算で求めた。30 サイクル終了後三軸圧縮試験を飽和状態で実施し、強度定数を求めた。なお、拘束応力の載荷方法は図-3.4 (1)(2)に示すように、 0.2 kgf/cm^2 の拘束応力では、モールド内に締固めた試料の上面より応力を載荷した。また、拘束応力 0.6 kgf/cm^2 では、三軸圧縮試験時の圧密過程と同じように水圧で等方応力を載荷した。表-3.4 に装置の仕様を示す。

乾湿繰返し試験は、試験岩石材料に乾燥状態(排水状態)および湿潤状態(水浸状態)をそれぞれ 48 時間ずつ 1 サイクルとして 30 サイクル与えた。試験は、岩石粒子に飽和度の変化を与えることによって生じると考えられる細粒化を把握することを目的とした。なお試験条件は以下に示す①・②の通りで、重量測定は 0.1 gf 程度の精度で測定した。

① 室内状態：室内状態(拘束応力を与えない状態)での試験を図-3.5 (1)に示す。試験は粒径 $63.5 \sim 25.4 \mu\text{m}$ の 3 粒径階で 10 個ずつ計 30 個について行った。排水後に室温で乾燥させる

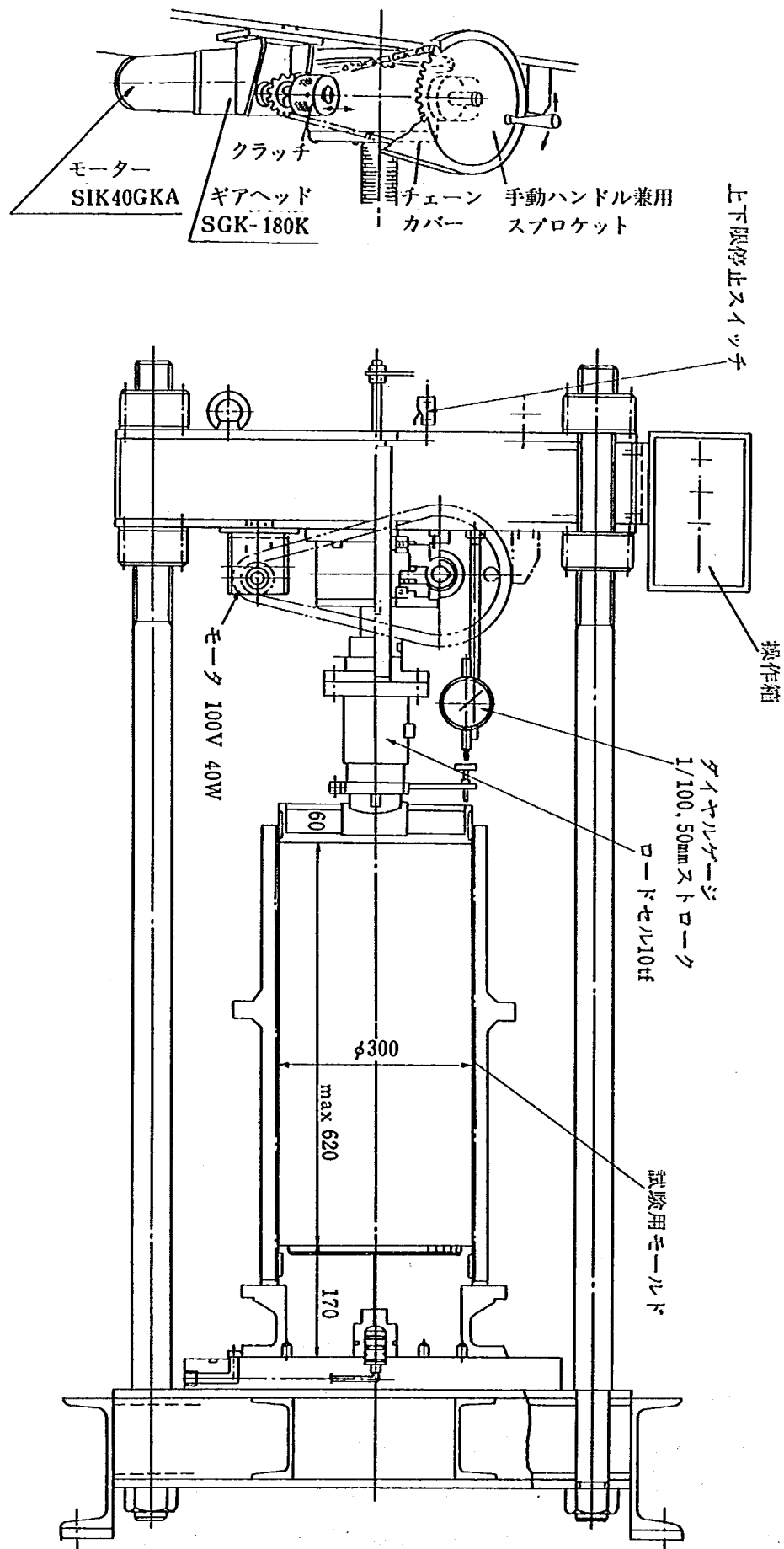


図-3.4(1) 長期载荷試験装置 拘側圧 0.2 kgf/cm^2

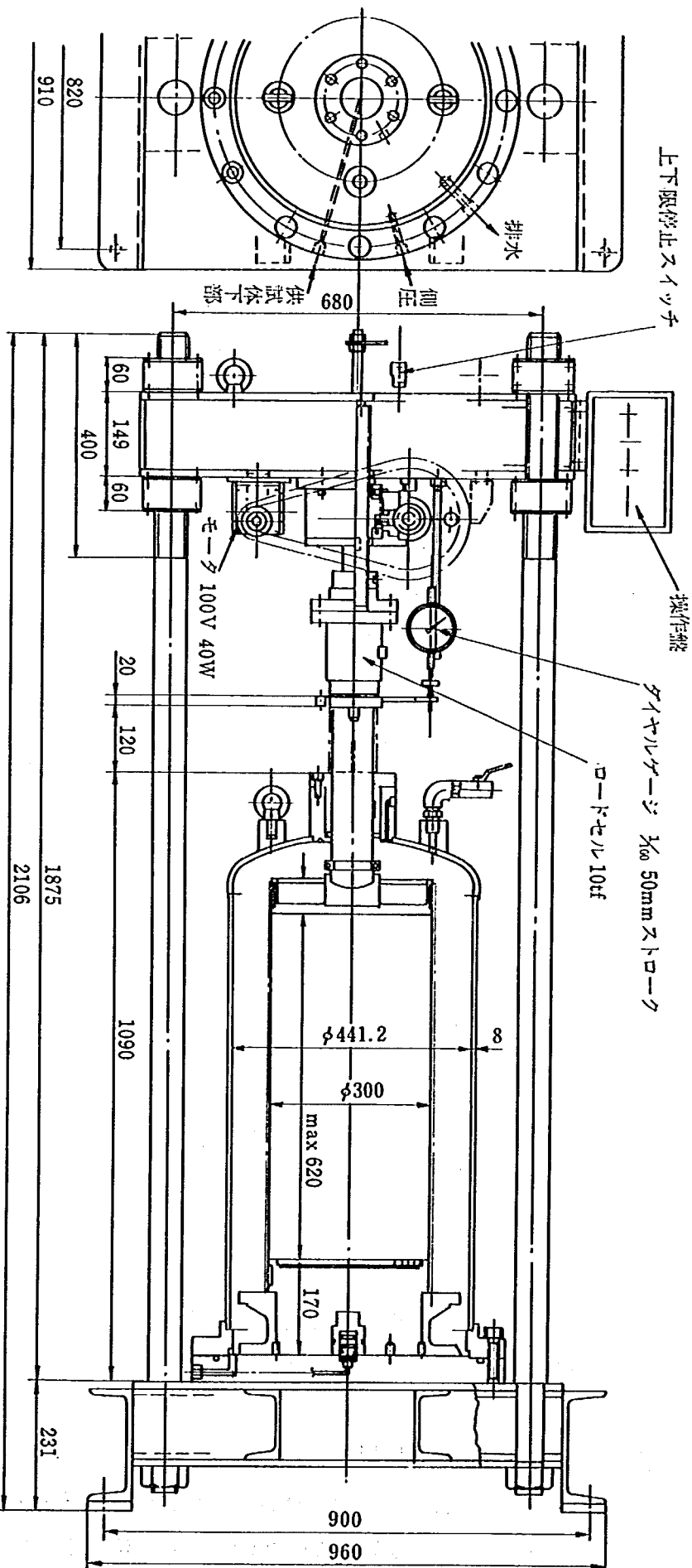
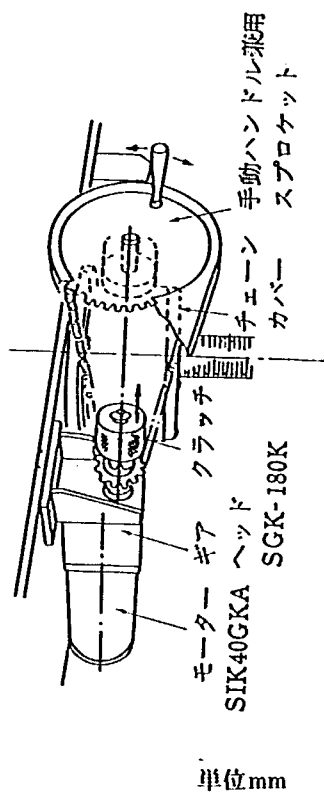
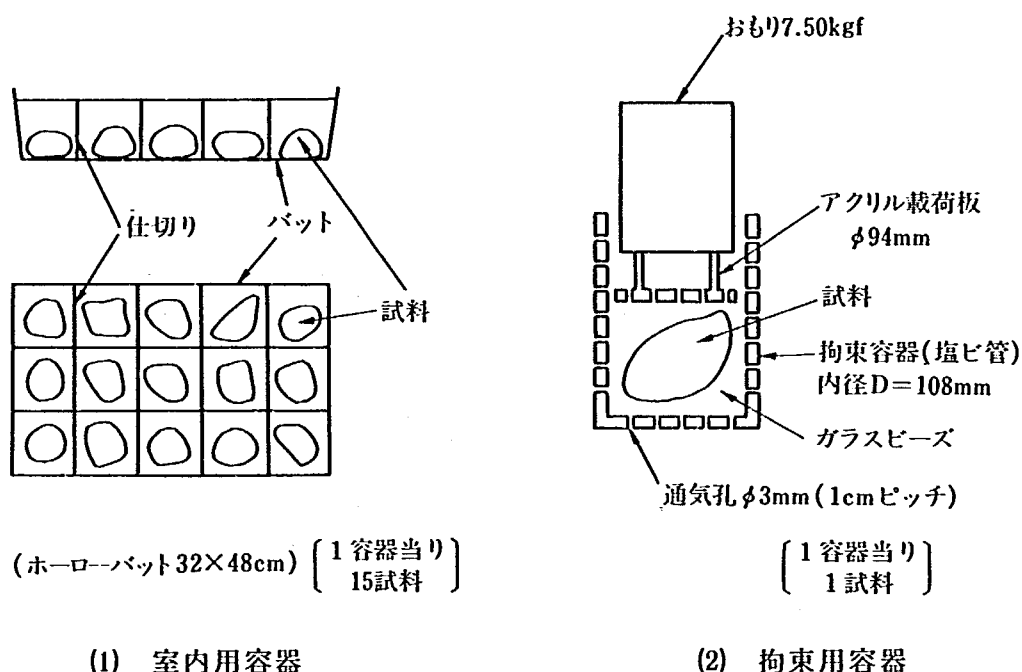


図-3.4(2) 長期載荷試験装置 側圧 0.6kgf/cm²

表－3.4 長期載荷試験装置仕様

項 目	仕 様
軸力載荷最大長	100 mm
ロ ー ド セ ル	最大 10 tonf ($10\text{kgf/cm}^2 = 7.07\text{ ton}$ 使用)
ピ ス ト ン 径	75 cm
制 御 ア ン プ	載荷応力表示 (最大 10.00 kgf/cm^2) および載荷応力制御
操 作 盤	モーター駆動制御および手動操作
モ ー タ ー	イグニッションモーター, 40W/200V, 3φ
ギ ャ 比	1/50



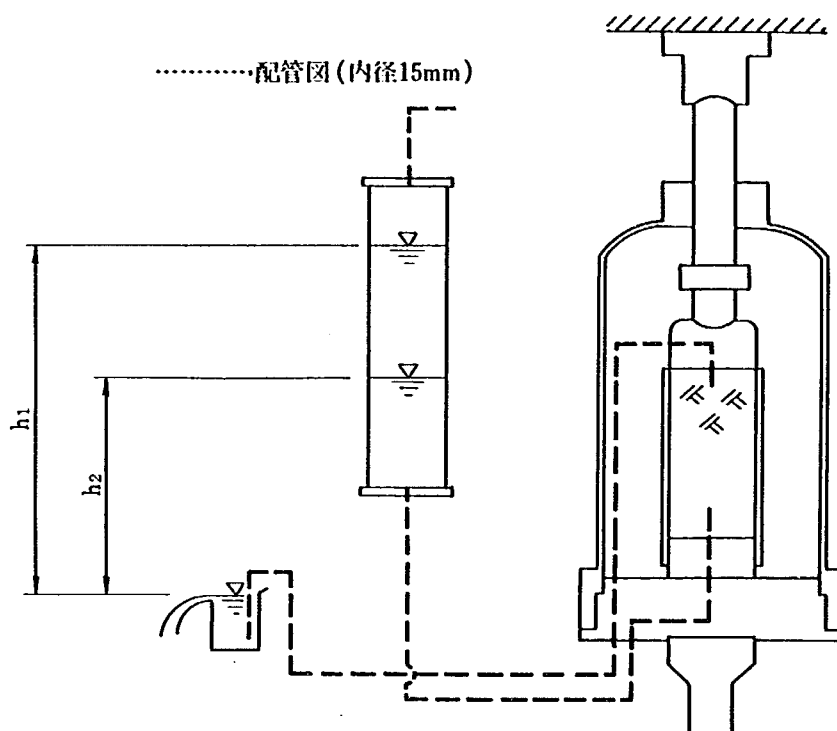
図－3.5 乾湿繰返し試験容器

室内・自然乾燥試験と、排水後 40°C で乾燥させる室内・強制乾燥試験を実施した。

- ② 拘束状態：拘束状態での試験を図－3.5(2)に示す。試験は直径 10 cm × 高さ 20 cm の容器にガラスビーズ（粒径約 2 mm，透水係数が約 1.1 cm/sec ）を入れ，1 個の岩石粒子を拘束し，排水後に室温で乾燥させる拘束・自然乾燥試験と，排水後 40°C で乾燥させる拘束・強制乾燥試験をそれぞれ 7 供試体および 8 供試体実施した。

3.6 変水位透水試験（輝緑凝灰岩）

大型三軸圧縮試験（飽和試験）および長期載荷試験（試験前・後）に使用する供試体直径 30 cm × 高さ 60 cm について JIS・A・1210— 変水位透水試験により図－3.6 に示す試験を実施し透水性を比較した。



図－3.6 変水位透水試験概略図

3.7 大型三軸圧縮試験（砂岩・輝緑凝灰岩）

本試験は土質工学会基準「土の三軸試験方法（案）」¹⁾に準拠して実施し供試体は締固め試験結果より得られた値より，相対密度で $Dr = 85\%$ の間隙比とそれより0.1大きい間隙比の2ケース（1ケース4供試体）で実施し，間隙比の統一は砂岩では圧密後間隙比で，輝緑凝灰岩では初期間隙比で統一した。

実験は，表－3.5に示す条件で実験した。不飽和・気乾状態（砂岩・輝緑凝灰岩），および飽和状態（輝緑凝灰岩），ひずみ制御により実施し，圧密は等方圧密で目標の側圧まで上昇させ，体積変化量が一定になったところでせん断を行う。せん断速度は供試体高に対し，砂岩では $1\%/min$ ・輝緑凝灰岩では $0.5\%/min$ で 17% まで行い終了とした。なお，大型三軸圧縮試験装置の構造・仕様を図－3.7・表－3.6に示す。

表－3.5 大型三軸圧縮試験条件

砂 岩 Ⅰ ・ Ⅱ	圧 縮 方 法	圧密排水・不飽和（気乾）状態
	せん断方法	軸変位制御 $6\text{ mm}/\text{min}$ ($1\%/\text{min}$)
	試験間隙比	圧密後間隙比 砂岩Ⅰ・ $Dr = 85\%$ (0.284) $Dr = 54\%$ (0.384) ($U_c = 9$) 砂岩Ⅱ・ $Dr = 85\%$ (0.329) $Dr = 61\%$ (0.400)
	試験側圧	1.5, 3.0, 4.5, 6.0 kgf/cm^2
輝 緑 凝 灰 岩	圧 密 方 法	圧密排水・不飽和（気乾）および飽和状態
	せん断方法	軸変位制御 $3\text{ mm}/\text{min}$ ($0.5\%/min$)
	試験間隙比	初期間隙比 ($U_c = 22$) $Dr = 85\%$ (0.264)
	試験側圧	1.0, 2.0, 4.0, 6.0 kgf/cm^2 (長期圧密 0.2, 0.6 kgf/cm^2)

表-3.6 大型三軸圧縮試験装置の仕様

試験装置	項目	仕様
大型三軸 圧縮試験機	供試体の寸法	D300×H600mm
	最大軸力	150 tonf ($\div 215 \text{ kgf/cm}^2$) ロードセル 50 tonf ($\div 72 \text{ kgf/cm}^2$)
	最大側圧	30 kgf/cm^2 ($\frac{\sigma_{1\max}}{\sigma_{3\max}} \div 7.2 \text{ kgf/cm}^2$) ブルドン管 10 kg/cm^2 ($\div 7.2$)
	ひずみ速度	6 mm/min (1%) 3 mm/min (0.5%)
	制御	ひずみ及び荷重制御可

3.8 試験後粒子破碎調査(砂岩・輝緑凝灰岩)

粒子破碎が生じる材料においては、粒子の破碎がせん断特性(強度・変形)に与える影響は無視できない。そこで、締固めおよびせん断による粒子破碎を調べるため、締固め試験後($e_{\max}$ を除く)および三軸圧縮試験後(各側圧毎)に粒度試験を行った。試験は各試験後、気乾状態(含水比約1%)で、供試体全試料についてふるい分け(JIS・A・1204)を行った。なお、粒子破碎はMarsalの定義²⁾(試験前各粒径毎の残留率マイナス試験後各粒径毎の残留率の総和を絶対値で示す)により求めた。

3.9 粒子形状³⁾および点载荷圧裂試験⁴⁾(砂岩・輝緑凝灰岩)

砂岩Ⅰ・Ⅱについては粒径6.35~9.52mmの5粒径で実施し、粒子形状は各粒径30個を図-3.8に示すように最大(a)・中間(b)・最短長(c)とし測定し、以下に示す式でq・pを計算した。

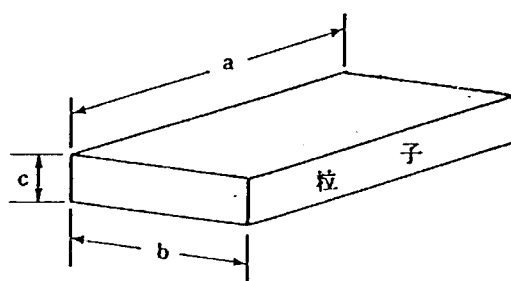


図-3.8 粒子形状図

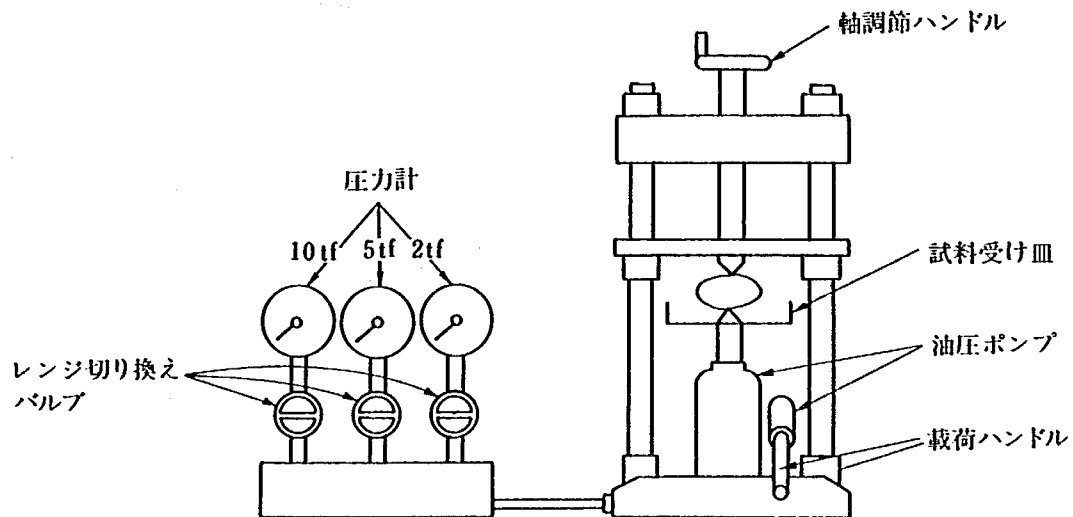
$$q = \frac{b}{a}$$

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

q : elongation ratio

p : flatness ratio

点载荷強度は各粒径10個を図-3.9に示す点载荷圧裂試験装置(ポイントロード)により载荷し圧裂強度を求めた。輝緑凝灰岩では、新鮮材料(実験室搬入直後の試料)を10個ずつ3粒径、乾湿繰返し試験後では室内・自然乾燥、室内・強制乾燥で各々10個ずつ3粒径、拘束・自然乾燥で6個、拘束・強制乾燥で7個実施し、比較することを目的とした。なお、点载荷圧裂強度 St は次式で与えられている。



図－3.9 点 載 荷 試 験 装 置

$$St = 0.891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

d：点载荷間隔

F：極 限 荷 重

3.10 X線分析⁵⁾ (輝緑凝灰岩)

本試験は「軟岩の調査・試験の指針」土木学会岩盤力学委員会第4分科会・昭和55年1月17日「X線粉末回折による鉱物の同定法」に準拠し実施したものである。X線分析により岩石鉱物の同定を行う。また、本試験時での鉱物変化を捉えるとともに変質粘土鉱物の一つであるモンモリロナイトの定量分析を行う。

試験材料は新鮮な材料と、乾湿繰返し後の試料とについて比較を実施し、乾湿の作用が岩石の鉱物組成に変化をさせていないかを見るために実施した。なお、分析試験条件を以下に列記した。

管	球	Cu	走 査 範 囲	$2\theta = 4^\circ \sim 40^\circ$
フ	ィ	Ni	走 査 速 度	$2^\circ/\text{min}$
電	圧	40 KV	電	流
記 録 紙 速 度		40 mm/min	30 mA	

4. 試験結果

「3. 試験方法」で説明した方法により試験を実施した結果を、砂岩と輝緑凝灰岩に分類し、以下に示す項目別に記載した。全体の総括として試験結果一覧表を表-4.1に示した。

4.1 物理試験

物性値は、表-4.2(1)(2)(3)に物性値一覧表、図-4.1(1)(2)(3)に粒径別物性値図を示した。砂岩Ⅰを表-4.2(1)・図-4.1(1)で見ると表乾比重 2.565~2.628, 絶乾比重 2.467~2.571, 真比重 2.646~2.737, 吸水率 2.19~4.00%, 同様に砂岩Ⅱについては、表-4.2(2)・図-4.1(2)で見ると、表乾比重 2.591~2.667, 絶乾比重 2.512~2.644, 真比重 2.706~2.726, 吸水率 1.04~3.12%で、平均比重・吸水率は砂岩Ⅰで 2.554, 3.02%, 砂岩Ⅱで 2.608%, 2.03%と、砂岩としての比重値は一般的な値であるが吸水率が若干多目である。また、含水比について見ると1%を越えている粒径は、砂岩Ⅰで粒径 4.76 mm以下の4粒径階、砂岩Ⅱで粒径 0.42~0.074 mmが越えているが、平均含水比ではそれぞれ 1.00%, 0.69%であり、試験材料としてこの状態で使用した。

輝緑凝灰岩については表-4.2(3)・図-4.1(3)で見ると表乾比重 2.777~2.868, 絶乾比重 2.716~2.834, 真比重 2.891~2.957, 吸水率も 1.21~2.23%の範囲にある。また、平均比重および平均吸水率はそれぞれ 2.843, 1.67%であった。また、含水比について見ると粒径別に含水比が1%を越えているものは、粒径 25.4~4.76 mmの3粒径階と、0.84 mm以下の3粒径階であり、平均値で 1.04%であった。

表 - 4.1 試験結果一覧表

ケース名	・岩種 ・均等係数 ・粒子形状 ^{*1}	・比重 ^{*2} ・吸水率 ^{*3} ・含水比 ・点載荷強度	側圧 σ_3 (kgf/cm ²)	初期乾燥 密度 γ_d (gf/cm ³)	間 隙 比 の 変 化				$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ kgf/cm ²	ϵ_f %	$(\Delta V/V)_f$ %	*5 破 壊 時			三軸圧縮 試験後破 砕率 (%)	強度定数 ϕ (度) c (kgf/cm ²)
					初 期 e_o	圧密後 e_c	最小 ^{*4} e_{min}	破壊時 e_f				変形係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比 ^{*5} y	主応力比 (σ_1/σ_3)		
V・D Dr=85% $\gamma_{dc}=1.989$	57年度 砂岩 I Uc=9	Gb=2.554 Q=3.02% W=1.00% St=110kgf/cm ²	1.7	1.944	0.314	0.275	0.258	0.269	9.76	8.04	0.5	121	0.47	6.74	6.9	$\phi=39.6$ $c=0.95$
			3.3	1.913	0.335	0.277	0.245	0.248	16.18	10.67	2.28	152	0.39	5.90	15.1	
			4.8	1.892	0.350	0.278	0.215	0.215	20.66	13.10	4.91	158	0.31	5.30	9.0	
			6.0	1.832	0.394	0.272	0.190	0.190	25.16	15.00	6.47	168	0.28	5.19	13.1	
M Dr=54% $\gamma_{dc}=1.845$	板・塊状	St=110kgf/cm ²	1.5	1.806	0.414	0.375	0.346	0.347	8.06	8.79	2.00	92	0.39	6.37	5.2	$\phi=38.4$ $c=0.82$
			2.7	1.786	0.430	0.373	0.303	0.303	12.49	14.71	5.10	85	0.33	5.63	8.3	
			4.8	1.748	0.461	0.379	0.282	0.282	19.46	15.00	6.98	130	0.27	5.05	10.7	
			6.0	1.722	0.483	0.373	0.260	0.260	22.77	15.00	8.22	152	0.23	4.80	11.1	
V・D Dr=85% $\gamma_{dc}=1.964$	58年度 砂岩 II Uc=9	Gb=2.608 Q=1.60% W=0.69% St=240 kgf/cm ²	1.26	1.937	0.347	0.328	0.320	0.334	8.75	6.56	-0.49	133	0.54	7.94	4.8	$\phi=43.7$ $c=0.71$
			3.0	1.915	0.362	0.327	0.291	0.304	17.12	9.44	1.75	181	0.41	6.71	8.3	
			4.5	1.901	0.372	0.329	0.287	0.288	23.17	11.62	3.03	199	0.37	6.15	15.1	
			5.0	1.890	0.380	0.327	0.277	0.277	24.16	12.08	3.79	200	0.34	5.83	10.8	
M Dr=61% $\gamma_{dc}=1.864$	板状	St=240 kgf/cm ²	1.5	1.829	0.426	0.399	0.377	0.385	8.27	8.80	1.04	94	0.44	6.51	5.1	$\phi=42.3$ $c=0.48$
			3.1	1.813	0.438	0.400	0.345	0.345	15.14	14.20	3.89	106	0.37	5.88	7.0	
			4.1	1.791	0.456	0.397	0.314	0.314	18.94	15.00	5.99	126	0.30	6.62	8.6	
			6.0	1.762	0.480	0.400	0.310	0.309	25.21	15.00	6.52	165	0.28	5.20	8.2	
V・D Dr=85% 不 飽 和	59年度 Uc=22 輝緑凝灰岩	Gb=2.843 Q=1.67% W=1.04% St=102.69kgf/cm ²	1.00	2.255	0.261	0.247	0.240	0.261	8.94	5.70	-1.13	157	0.60	9.94	6.0	$\phi=42.34$ $c=1.162$
			2.00	2.251	0.263	0.236	0.223	0.236	13.82	7.02	0.00	197	0.50	7.91	7.1	
			4.05	2.250	0.264	0.233	0.209	0.215	22.41	8.60	1.47	261	0.42	6.53	9.7	
			6.01	2.254	0.261	0.217	0.186	0.192	29.72	9.57	2.07	311	0.39	5.95	9.8	
V・D Dr=85% 飽 和	板・葉状	St=102.69kgf/cm ²	1.04	2.249	0.264	0.256	0.237	0.242	5.59	8.38	0.85	76	0.45	6.38	8.3	$\phi=39.41$ $c=0.519$
			2.00	2.249	0.264	0.247	0.217	0.220	9.44	9.68	2.16	98	0.39	5.72	10.1	
			4.00	2.249	0.264	0.236	0.195	0.196	16.07	11.42	3.27	141	0.36	5.02	13.0	
			6.00	2.248	0.264	0.223	0.178	0.178	23.02	12.48	3.66	184	0.35	4.84	14.4	
V・D Dr=85% 長期載荷試験後			0.25	2.254	0.261	0.259	0.257	0.276	2.07	6.08	-1.36	34	0.61	9.28	8.8	$\phi=45.21$
			0.61	2.332	0.219	0.209	0.197	0.207	3.83	8.30	1.27	46	0.42	7.28	6.0	$c=0.174$

*1 Zinggの分類による。

*2 粒径 4.76mm で分級し，4.76mm 以上は絶対比重 (Gb)，以下は真比重 (Gg) により，各粒径別重量百分率よりおもみ付き平均した値

*3 粒径 4.76mm 以上について求め，4.76mm 以上を 100% とした時の各粒径別おもみ付き平均値

*4 セン断時に最も圧縮した時の間ゲキ比

*5 体積ヒズミより $\epsilon_r = \epsilon_v - \epsilon/2$ ， $y = -\epsilon_r/\epsilon$ で求めた値

表 - 4. 2 (1) 物理試驗結果一覽表

(砂岩 I)

試驗項目 粒徑 (mm)	物 性 值				吸 水 量 Q (%)
	含 水 比 (%)	真 比 重 G _g	絕乾比重 G _b	表乾比重 G _a	
63.5 ~ 50.8	0.60	2.725	2.571	2.628	2.19
50.8 ~ 38.1	0.80	2.724	2.569	2.625	2.22
38.1 ~ 25.4	0.89	2.727	2.551	2.616	2.53
25.4 ~ 19.1	0.95	2.729	2.537	2.607	2.77
19.1 ~ 9.52	0.97	2.734	2.515	2.595	3.19
9.52 ~ 4.76	0.90	2.737	2.467	2.565	4.00
4.76 ~ 2.00	1.25	2.674	—	—	—
2.00 ~ 0.84	1.30	2.667	—	—	—
0.84 ~ 0.42	1.78	2.646	—	—	—
0.42 ~ 0.074	1.80	2.648	—	—	—
平 均 值	1.00	2.554			3.02

表 - 4. 2 (2) 物理試驗結果一覽表

(砂岩 II)

試驗項目 粒徑 (mm)	物 性 值				吸 水 量 Q (%)
	含 水 比 (%)	真 比 重 G _g	絕乾比重 G _b	表乾比重 G _a	
63.5 ~ 50.8	0.27	2.718	2.644	2.667	1.04
50.8 ~ 38.1	0.42	2.718	2.624	2.664	1.32
38.1 ~ 25.4	0.37	2.722	2.640	2.669	1.16
25.4 ~ 19.1	0.84	2.716	2.574	2.627	2.06
19.1 ~ 9.52	0.79	2.721	2.569	2.625	2.18
9.52 ~ 4.76	0.83	2.726	2.512	2.591	3.12
4.76 ~ 2.00	0.72	2.718	—	—	—
2.00 ~ 0.84	0.68	2.712	—	—	—
0.84 ~ 0.42	0.91	2.706	—	—	—
0.42 ~ 0.074	1.00	2.706	—	—	—
平 均 值	0.69	2.608			2.03

表 - 4. 2 (3) 物理試驗結果一覽表

(輝綠凝灰岩)

試驗項目 粒徑 (mm)	物 性 值				吸 水 量 Q (%)
	含 水 比 (%)	真 比 重 G _g	絕乾比重 G _b	表乾比重 G _a	
63.5 ~ 50.8	0.80	2.933	2.834	2.868	1.21
50.8 ~ 38.1	0.94	2.919	2.824	2.857	1.15
38.1 ~ 25.4	0.88	2.923	2.815	2.852	1.31
25.4 ~ 19.1	1.00	2.904	2.789	2.828	1.45
19.1 ~ 9.52	1.06	2.920	2.774	2.849	1.81
9.52 ~ 4.76	1.03	2.891	2.716	2.777	2.23
4.76 ~ 2.00	0.89	2.957	—	—	—
2.00 ~ 0.84	0.82	2.937	—	—	—
0.84 ~ 0.42	1.12	2.918	—	—	—
0.42 ~ 0.074	1.93	2.931	—	—	—
平 均 值	1.04	2.843			1.62

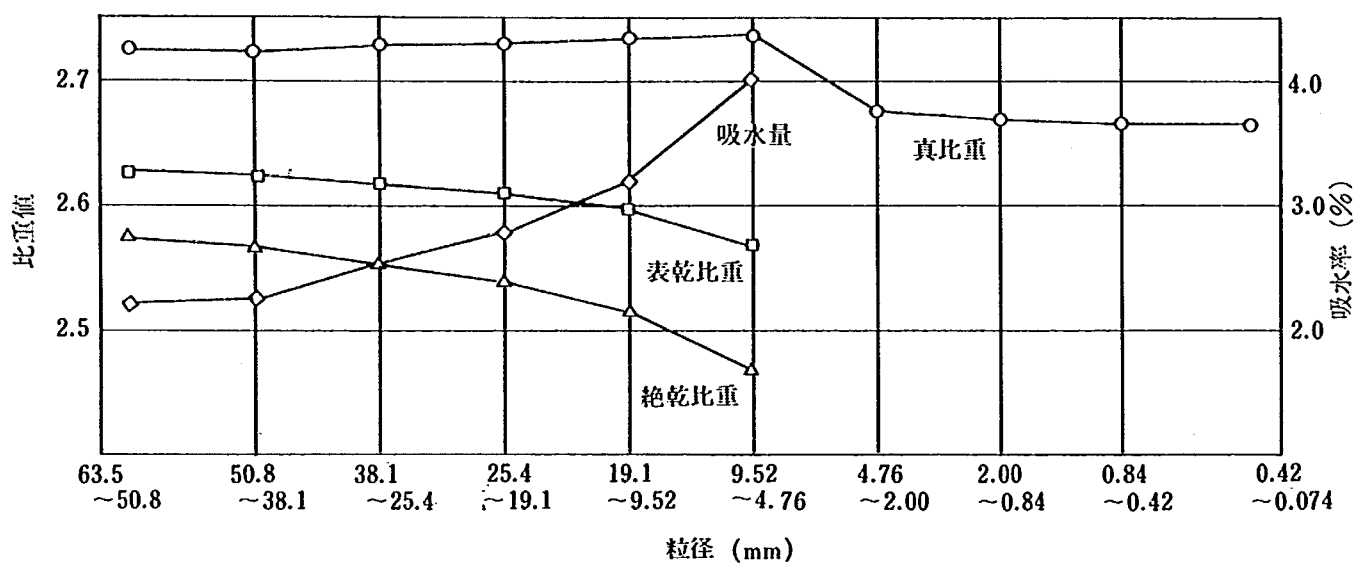


图 - 4.1 (1) 粒径别物性值图 (砂岩 I)

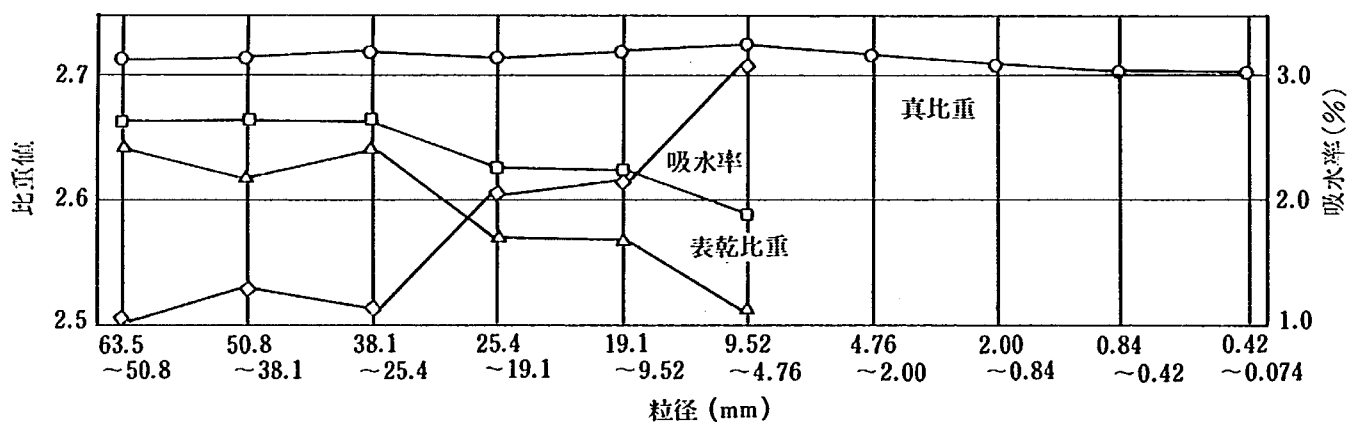


图 - 4.1 (2) 粒径别物性值图 (砂岩 II)

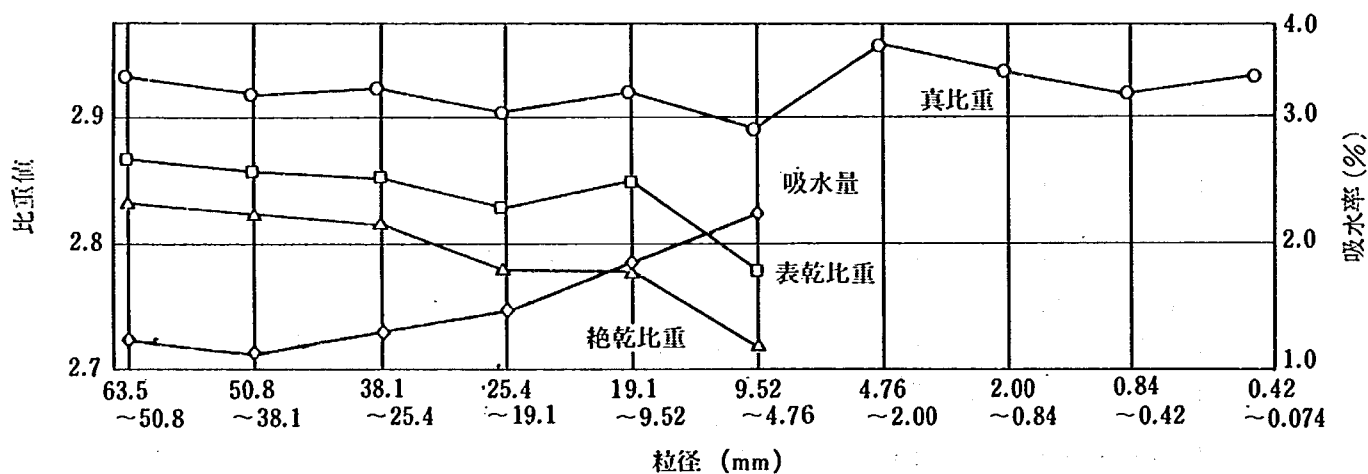


图 - 4.1 (3) 粒径别物性值图 (辉绿凝灰岩)

4.2 締固め試験

砂岩Ⅰでの締固まり曲線を図-4.2(1)で見ると、15秒までは締固まり傾向にある。しかし、20秒を過ぎると締固まらずほぼ一定の密度状態になる。破碎率について図-4.2(2)(3)で見ると3秒で5.1%、7秒で4.4%、10秒で6.3%、20秒で7.4%、30秒で11.1%である。以上より20~30秒で間隙比の変動がなく、破碎率が急増する傾向にあるため、20秒の間隙比0.236を最小間隙比(e_{min})とし、投入時の間隙比の平均0.558を最大間隙比(e_{max})とした。

砂岩Ⅱでの締固まり曲線を図-4.3(1)で見ると、3.0以後の間隙比の値が一定となる傾向にあり、破碎率については図-4.3(2)(3)で見ると2秒・2.1%、4秒・1.4%、20秒・2.1%、30秒・3.3%、40秒・4.6%と増加傾向にあるが30秒で3.3%と砂岩Ⅰに比べてはるかに少ない目の傾向にある。以上より最小間隙比(e_{min})は30秒の0.287、最大間隙比(e_{max})は0.578とした。砂岩Ⅰは破碎が多く粒子が細粒化され良く締まる傾向にあるが、砂岩Ⅱは、粒子の細粒化が少ない岩である。

輝緑凝灰岩の締固まり曲線図-4.4(1)を見ると、間隙比の減少は20秒までは大きく変化しているが、20秒を過ぎると10秒間で0.01程度の減少で50秒まで続いている。これは輝緑凝灰岩の試験粒度が均当係数 $U_c=22$ と良粒度であるため良く締固まる傾向にある。破碎については図-4.4(2)(3)を見るとバラツキが多いが傾向としては5秒・2.3%、10秒・2.8%、30秒(平均)・3.3%、50秒・4.3%と非常に少ない値であるがこれも上述の良粒度による所である。以上の結果より最小間隙比(e_{min})は30秒の0.230とし、最大間隙比(e_{max})は0.461とした。輝緑凝灰岩は締固まり程度は問題無く良いと言えるが、現場粒度では、細粒分が多く含まれる粒度分布もあるのでロック材としての排水性に注意をする必要がある。

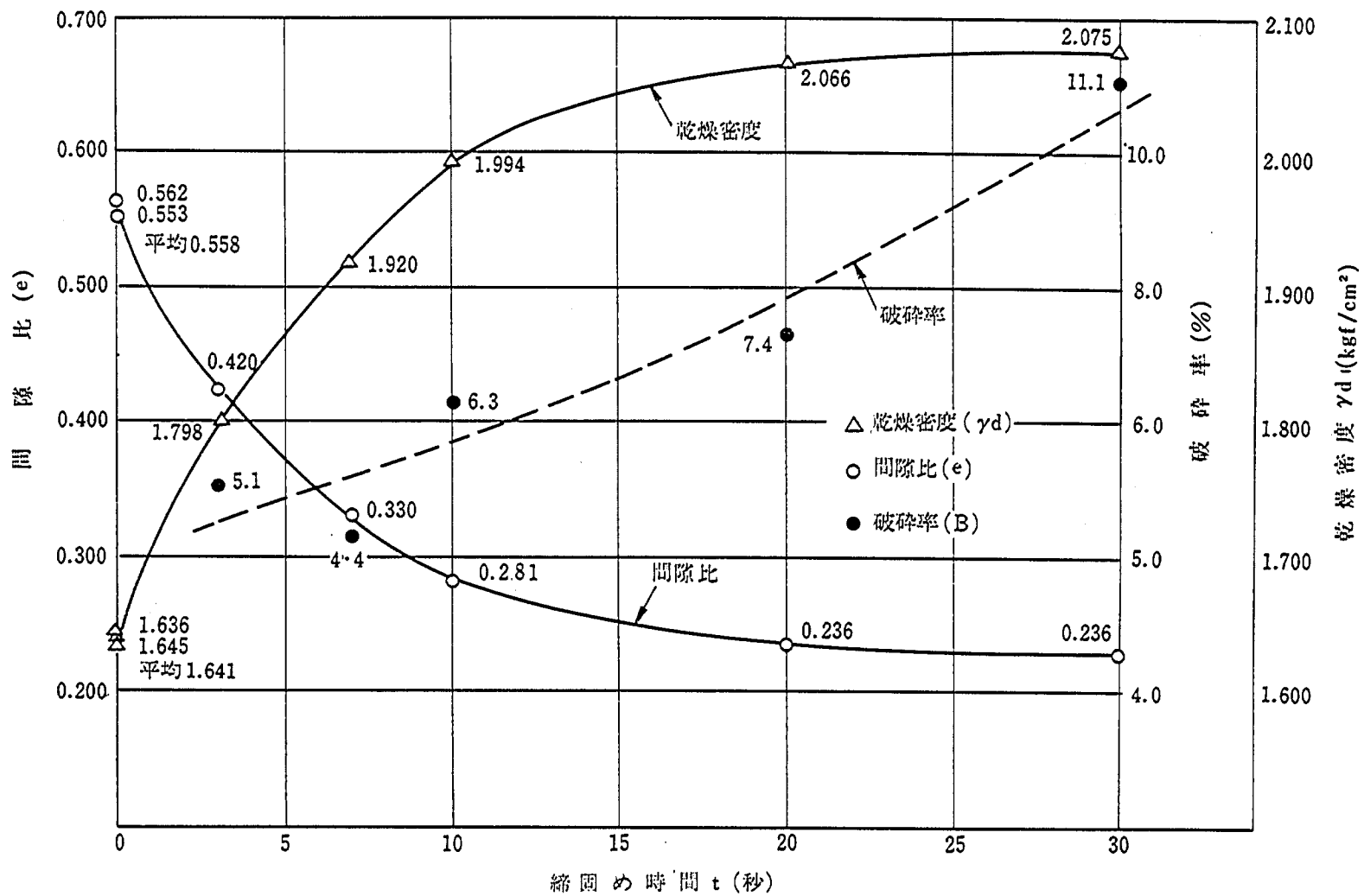


図 - 4. 2 (1) 締固め試験結果 (砂岩 I)

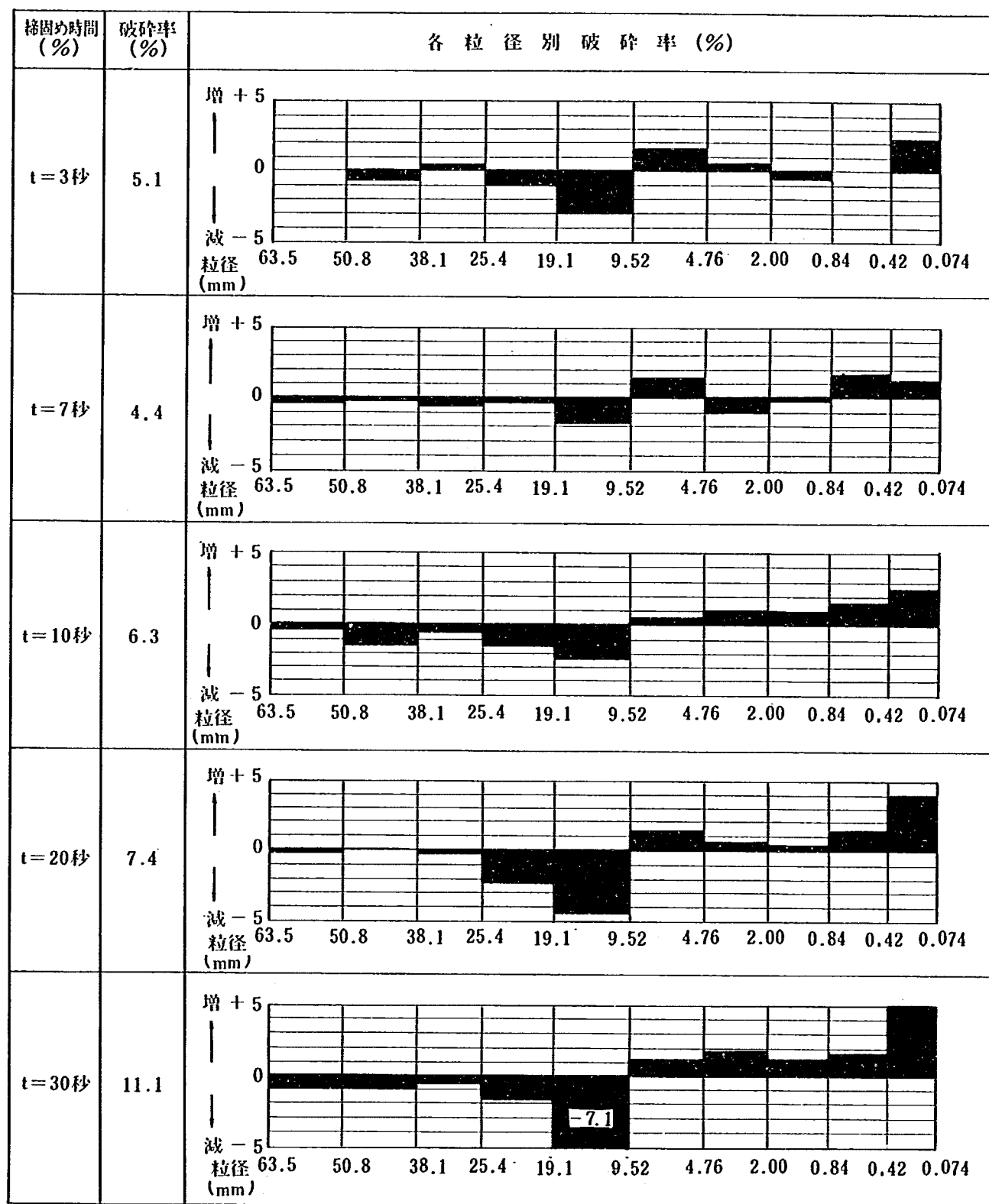


図 - 4. 2 (2) 締固め後粒度試験結果 (砂岩 I)

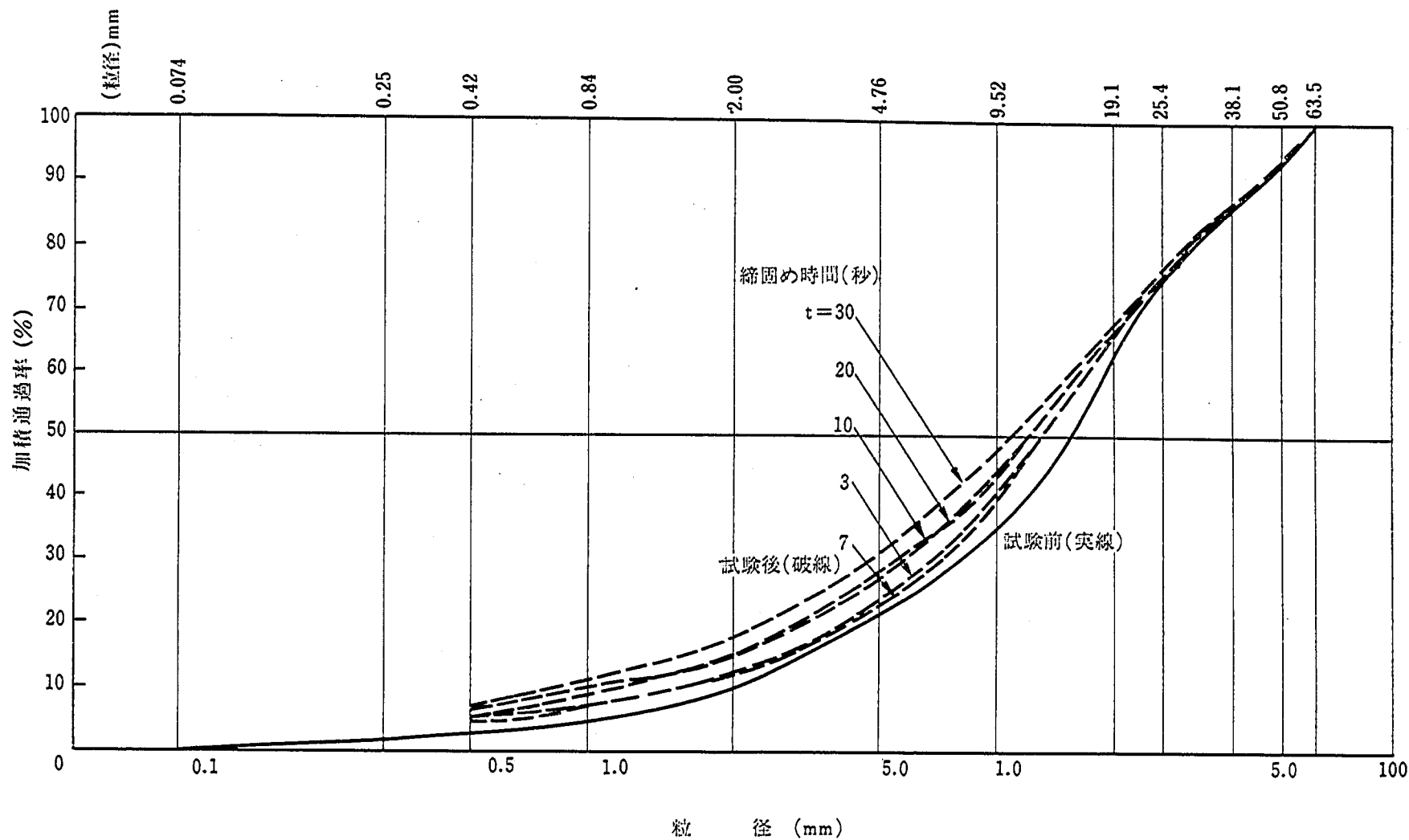


図 - 4.2 (3) 締固め試験前後の加積通過曲線 (砂岩 I)

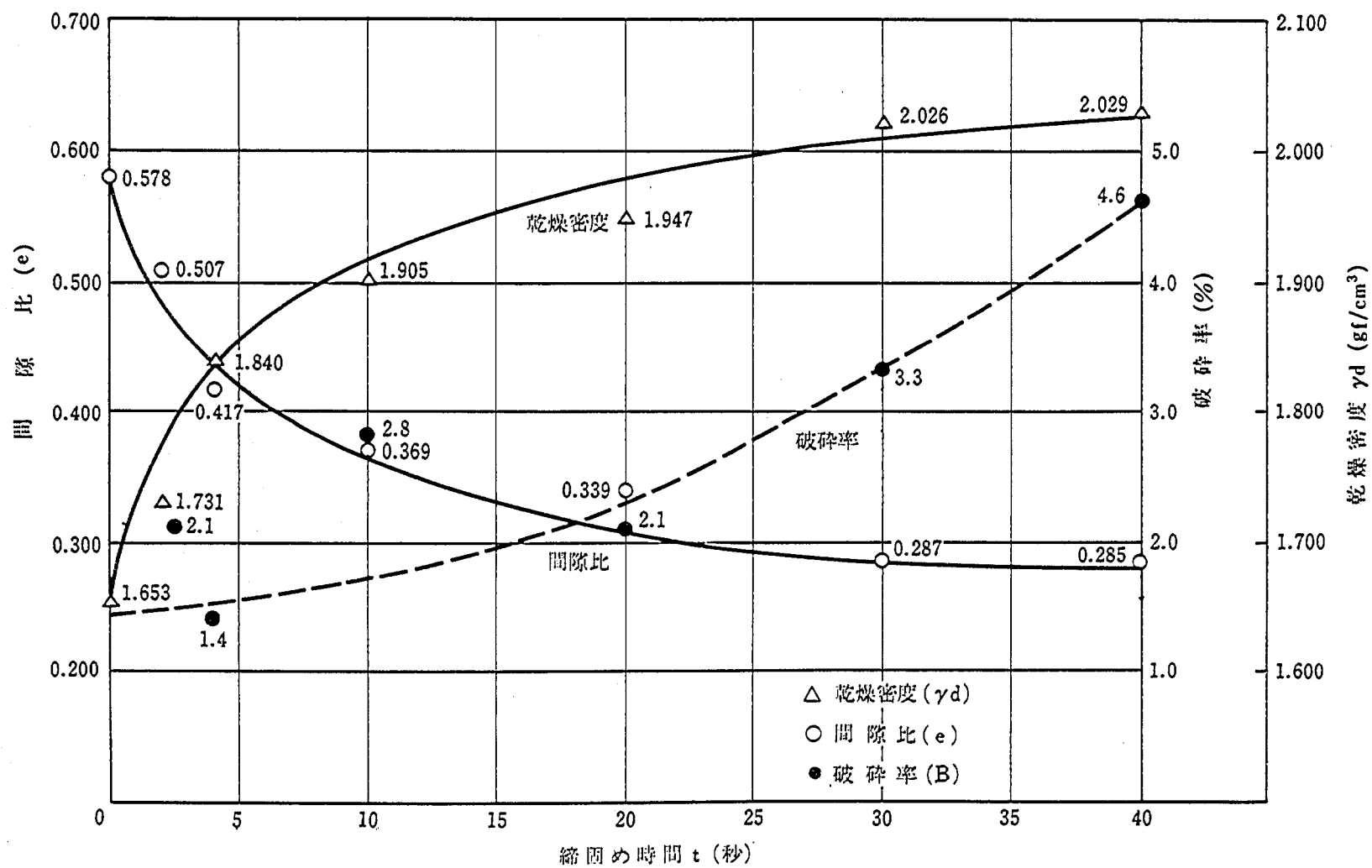


図 - 4.3(1) 締固め試験結果 (砂岩Ⅱ)

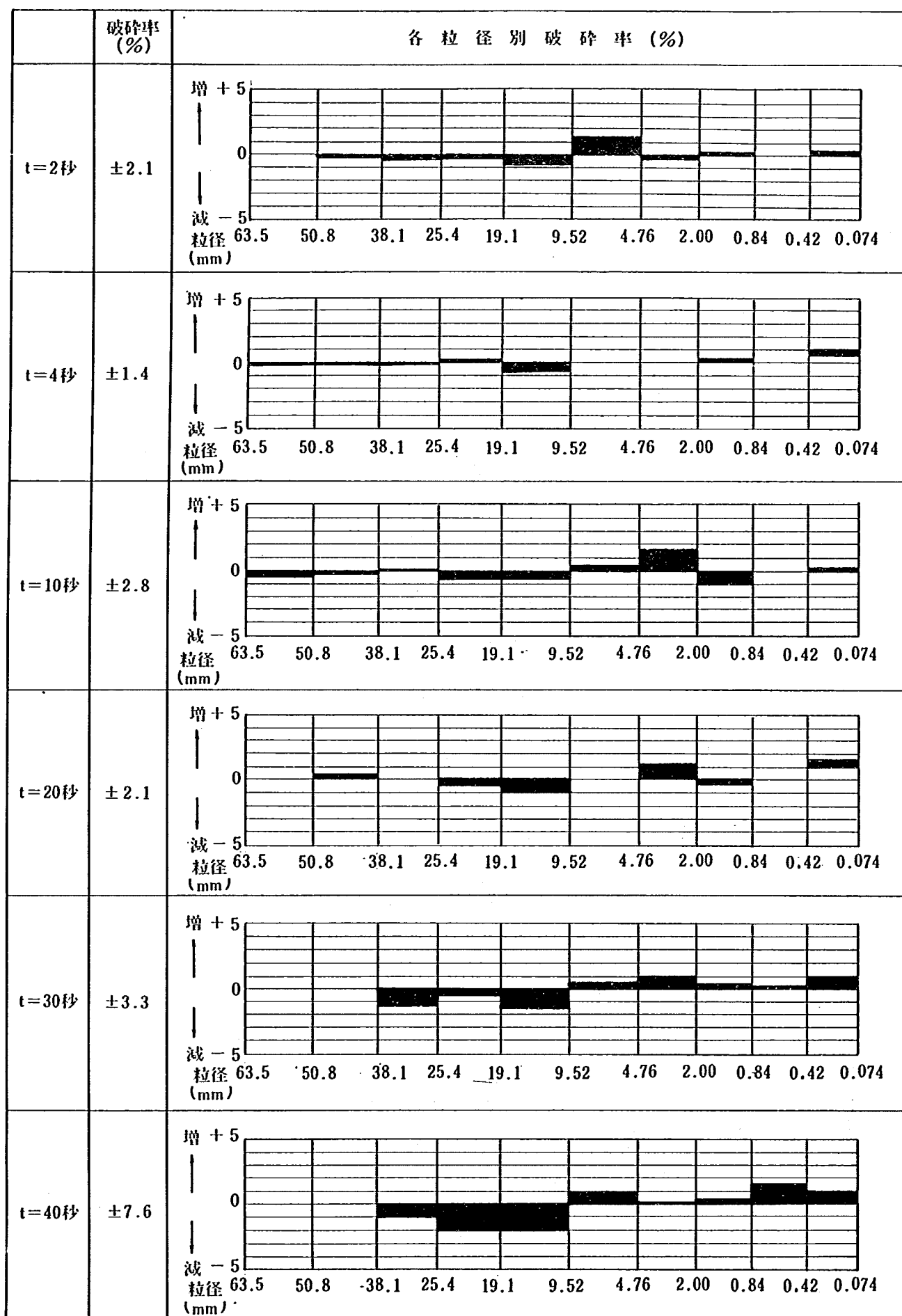


図 - 4.3 (2) 締固め後粒度試験結果 (砂岩 II)

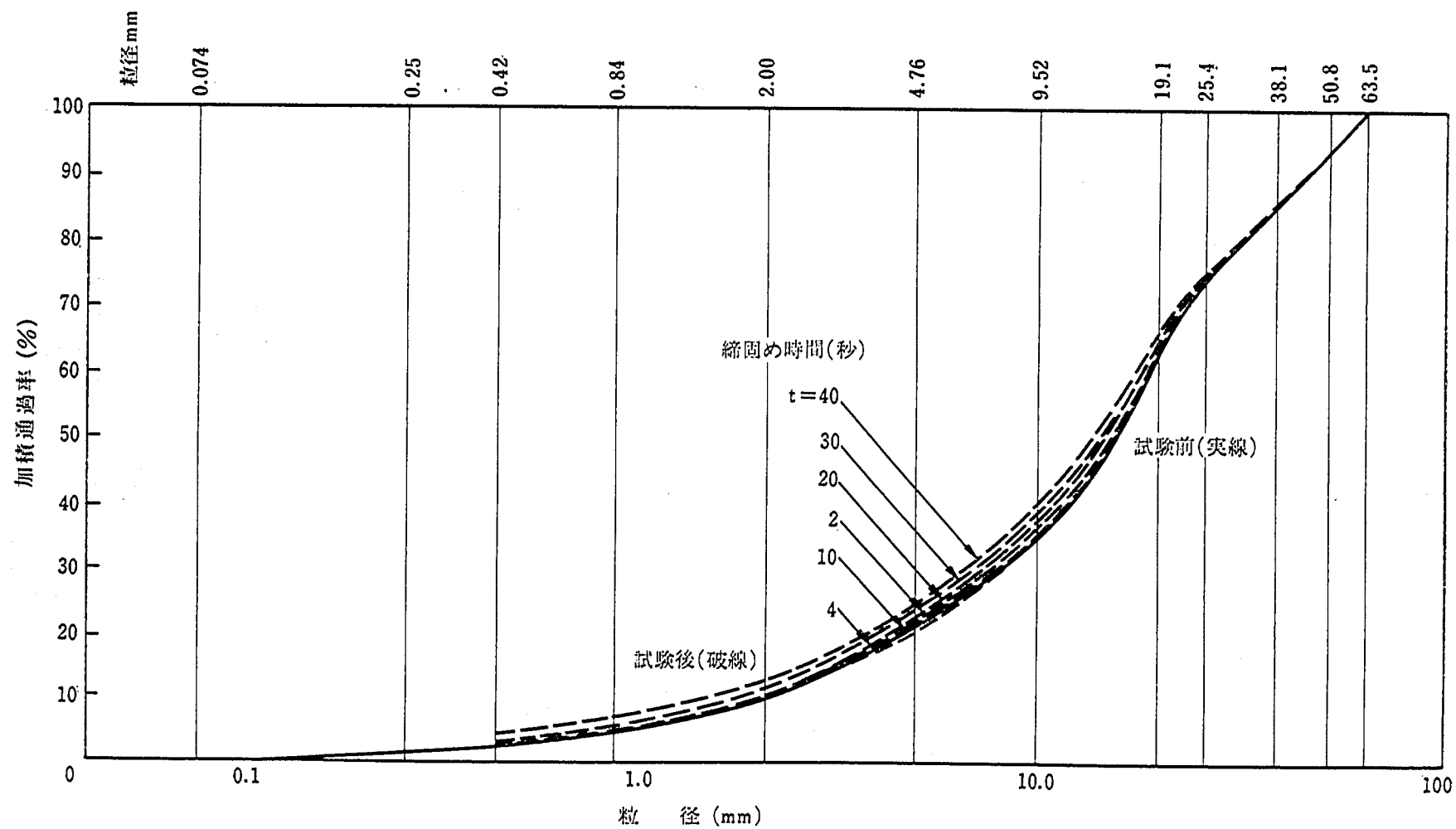


図 - 4.3 (3) 締め固め試験前後の加積通過曲線 (砂岩 II)

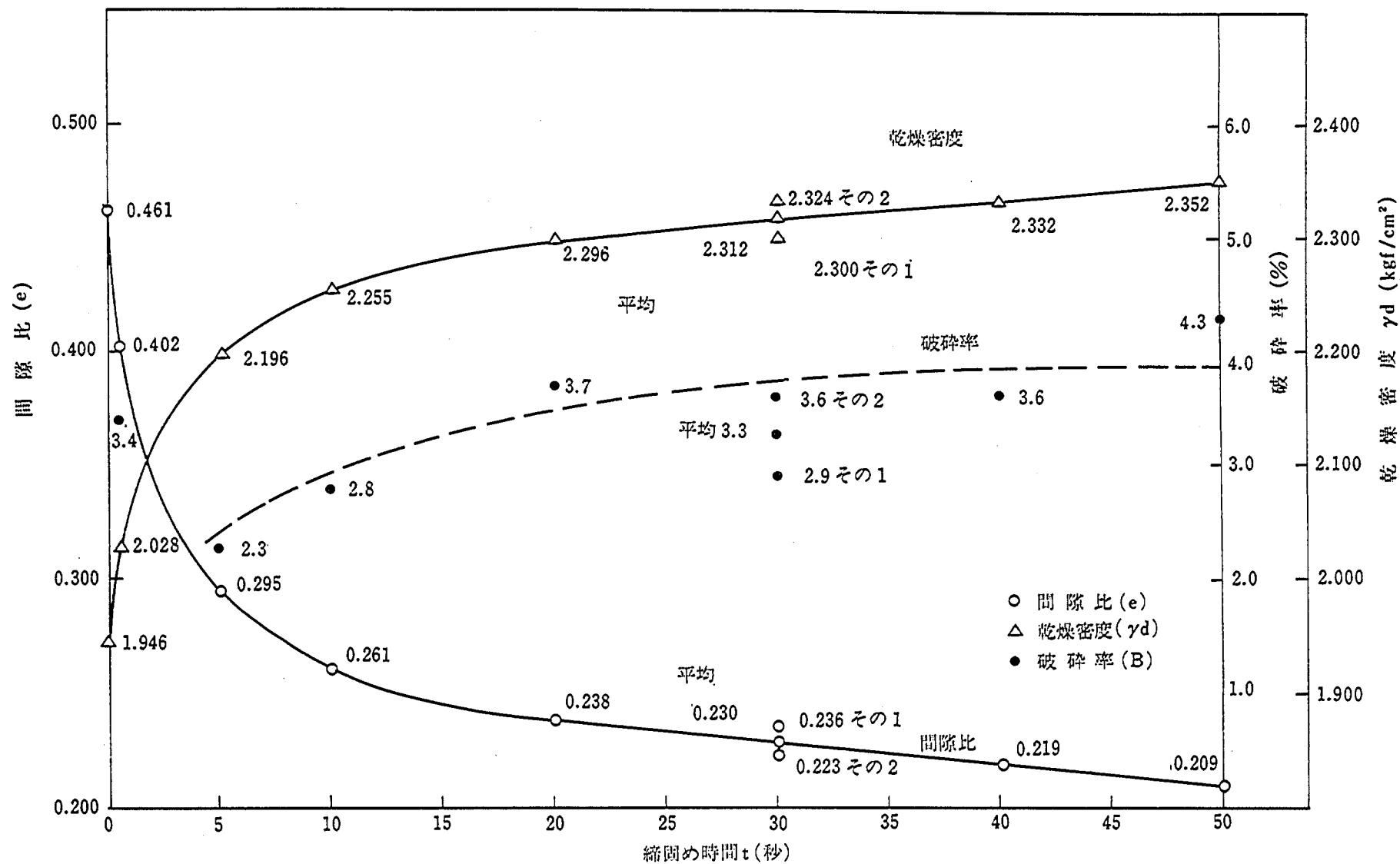


図 - 4.4 (1) 締固め試験結果 (輝緑凝灰岩)

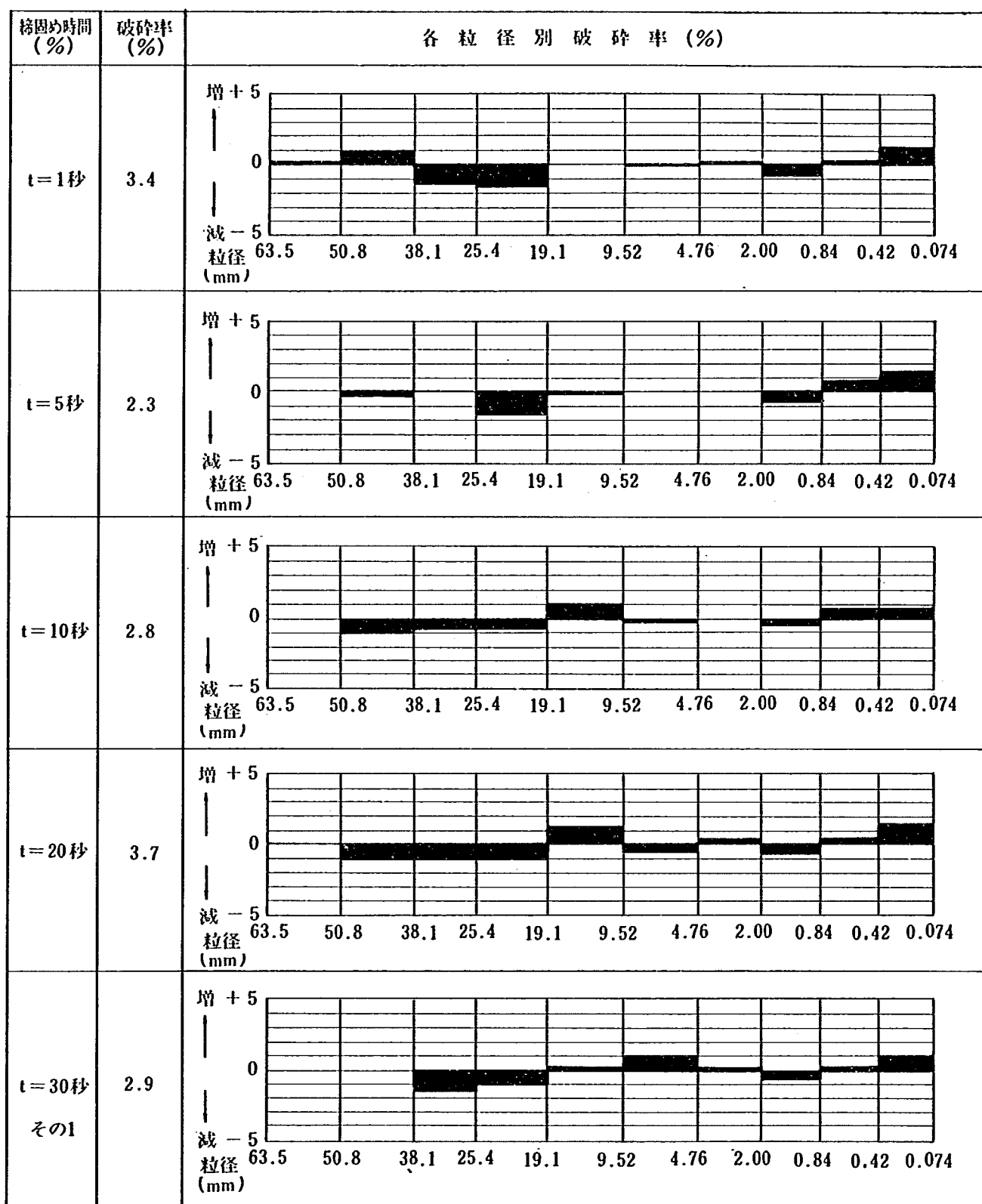


図 - 4. 4 (2) 締固め後粒度試験結果 (輝緑凝灰岩)

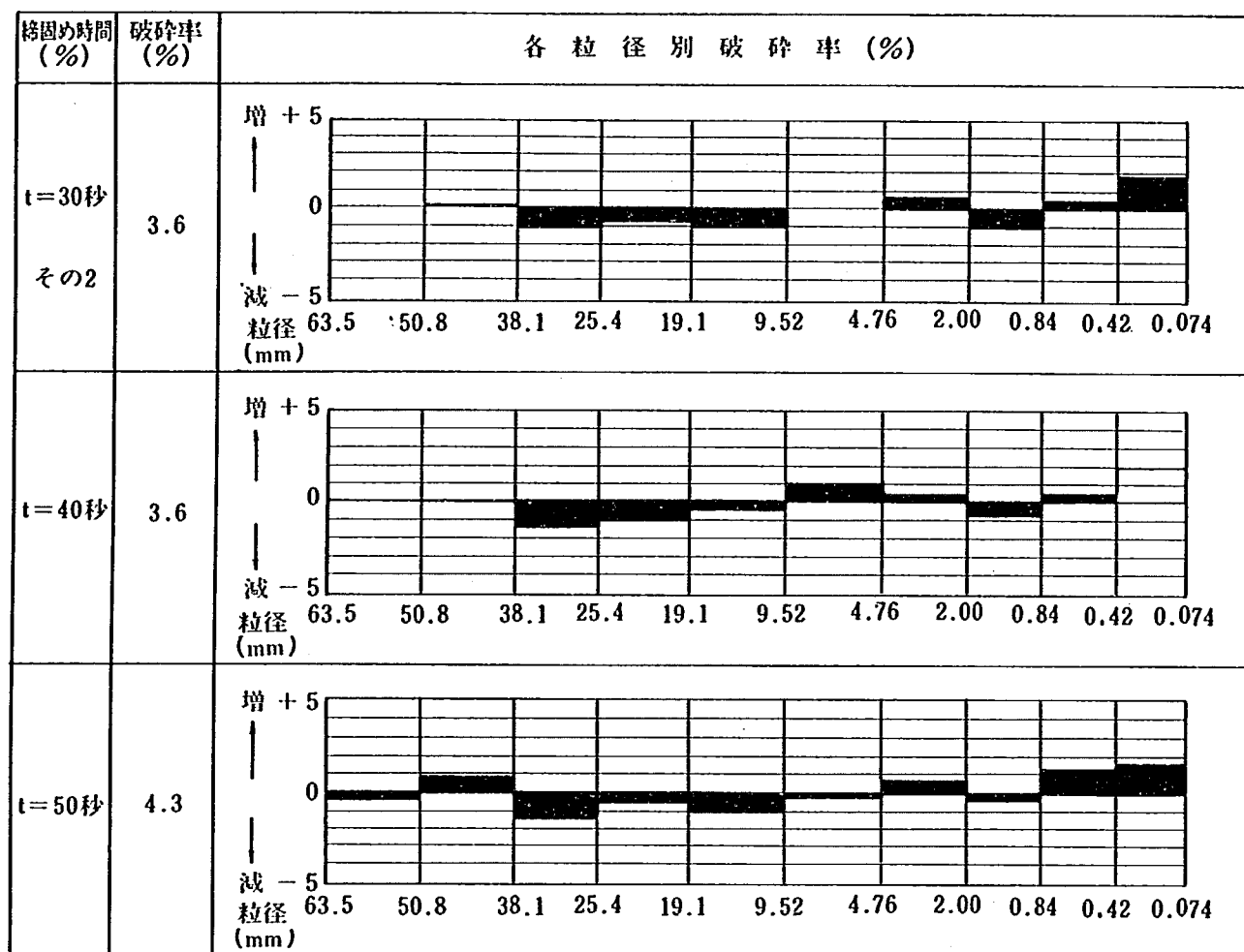


図 - 4. 4 (2) 締固め後粒度試験結果 (輝緑凝灰岩)

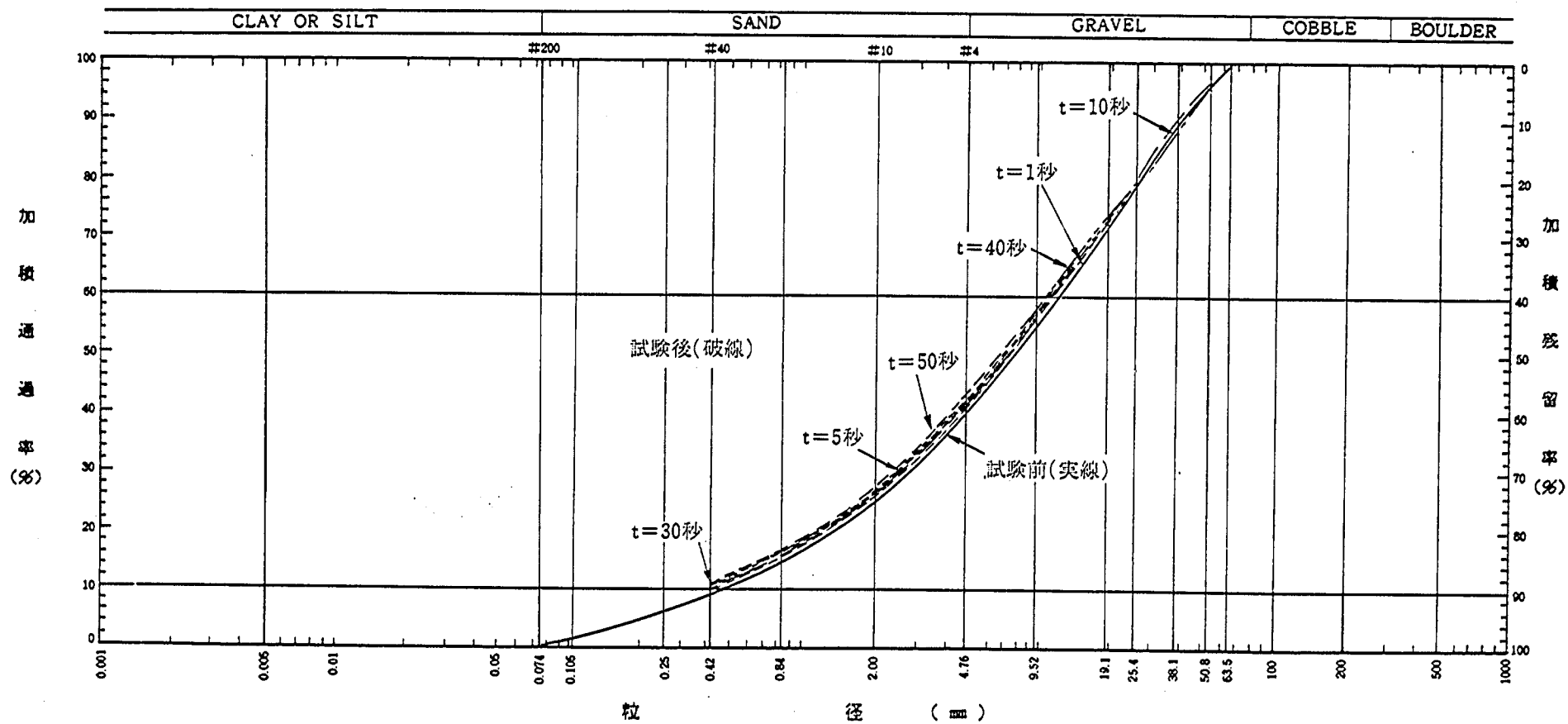


図 - 4. 4 (3) 締固め試験前後の加積通過曲線 (輝緑凝灰岩)

4.3 大型三軸圧縮試験

大型三軸圧縮試験の供試体の間隙比は相対密度で $Dr=85\%$ 程度のケースと、 $Dr=85\%$ 程度の間隙比プラス 0.1 の間隙比のケースの 2 種類とした。また砂岩では圧密後の間隙比 (e_c) を統一させ、砂岩 I で $0.272 \sim 0.278$ (相対密度 $87 \sim 88\%$)・ $0.373 \sim 0.379$ (相対密度 $56 \sim 57\%$) で、砂岩 II では $0.327 \sim 0.329$ (相対密度 $85 \sim 86\%$)・ $0.397 \sim 0.400$ (相対密度 $61 \sim 62\%$) で試験を実施した。輝緑凝灰岩では初期間隙比で統一し、新鮮材料 (搬入直後試料) について不飽和試験、飽和試験を実施し、長期載荷試験終了後供試体については飽和試験を実施した。供試体の間隙比は不飽和試験で $0.261 \sim 0.264$ (相対密度 $85\% \sim 87\%$)、飽和試験で 0.264 (相対密度 85%)、長期圧密後試験で 0.262 (相対密度 86%) で試験を実施した。

4.3.1 砂岩 (砂岩 I・II)

1) 強度定数

モールの応力円を図-4.5・図-4.6 に、側圧と最大主応力差の関係を図-4.7 に示した。なお、破壊時包絡線は最小二乗法により求めている。

砂岩 I と砂岩 II について、せん断抵抗角 (ϕ_d) を同程度の相対密度で比較すると、 $Dr=85\%$ で 4 度強・ $Dr=54 \cdot 61\%$ で 4 度弱と砂岩 II の方が大きく現われている。また、見掛けの粘着力 C_d (以下粘着力という)、では逆に $Dr=85\%$ で 0.2 kgf/cm^2 、 $Dr=54 \cdot 61\%$ で、 0.3 kgf/cm^2 程度砂岩 II の方が小さい値を示している。

また、砂岩 I と砂岩 II のそれぞれについて締固め程度による間隙比と内部摩擦角・粘着力の関係を図-4.8 で見ると、せん断抵抗角は相対密度の高い方が低いものより砂岩 I では 1.2 度、砂岩 II では 1.4 度大きく、粘着力も同様に、砂岩 I で 0.13 kgf/cm^2 、砂岩 II で 0.23 kgf/cm^2 大きく現われ、良く締固まったケースの方が大きな強度を示すといえる。

側圧と最大主応力差の関係を図-4.7 で見ると、砂岩 II の $Dr=54\%$ では、砂岩 I の $Dr=85\%$ よりも密度は低いにもかかわらず大きい最大主応力値を全側圧で示している。また砂岩 II の最大側圧の値が極端に小さな値となり頭折れの曲線となっている。

Dr [*] (圧密度) (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	ϵ_f (%)	ϵ_{vf} (%)	m ₀	f ₀
88	1.7	9.76	11.46	8.04	0.50	3.522	4.029
87	3.3	16.18	19.48	10.67	2.28		
87	4.8	20.66	25.46	13.10	4.91		
88	6.0	25.16	31.16	15.00	6.47		

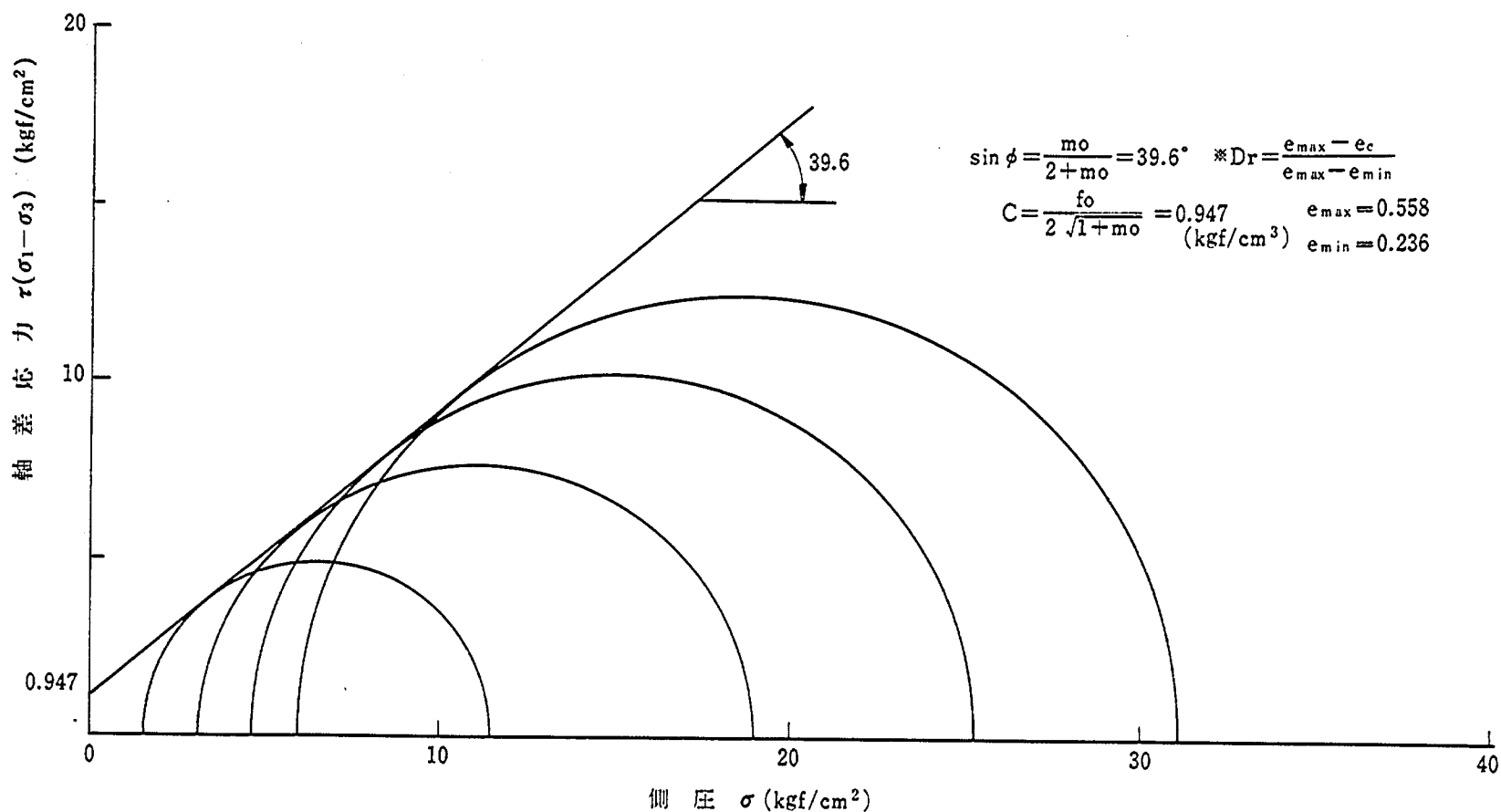


図 - 4.5 (1) モールの応力円 (砂岩 I, 目標相対密度 Dr = 85%)

Dr* (圧密度) (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	ϵ_f (%)	ϵ_{vf} (%)	m ₀	f ₀
57	1.5	8.06	9.56	8.79	2.00	3.278	3.403
57	2.7	12.49	15.19	14.71	5.10		
56	4.8	19.46	24.26	15.00	6.98		
57	6.0	22.77	28.77	15.00	8.22		

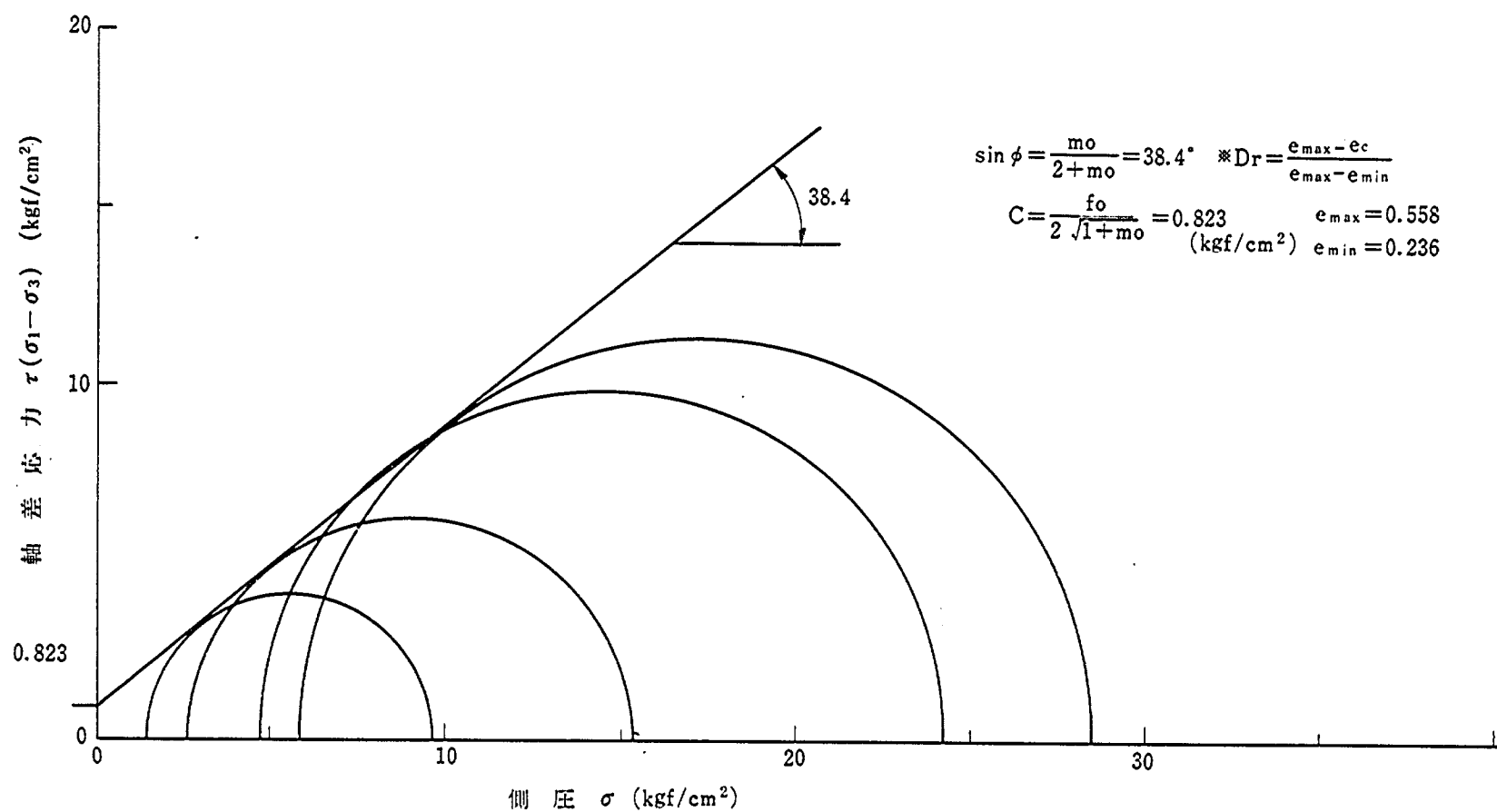


図 - 4.5 (2) モールの応力円 (砂岩 I, 目標相対密度 Dr = 54%)

Dr [*] (圧密度) (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	ϵf (%)	$\epsilon v f$ (%)	m _o	f _o
85	1.26	8.75	10.01	6.56	-0.49	4.460	3.324
86	3.0	17.12	20.12	9.44	1.75		
85	4.5	23.17	27.67	11.62	3.03		
86	5.0	24.16	29.16	12.08	3.79		

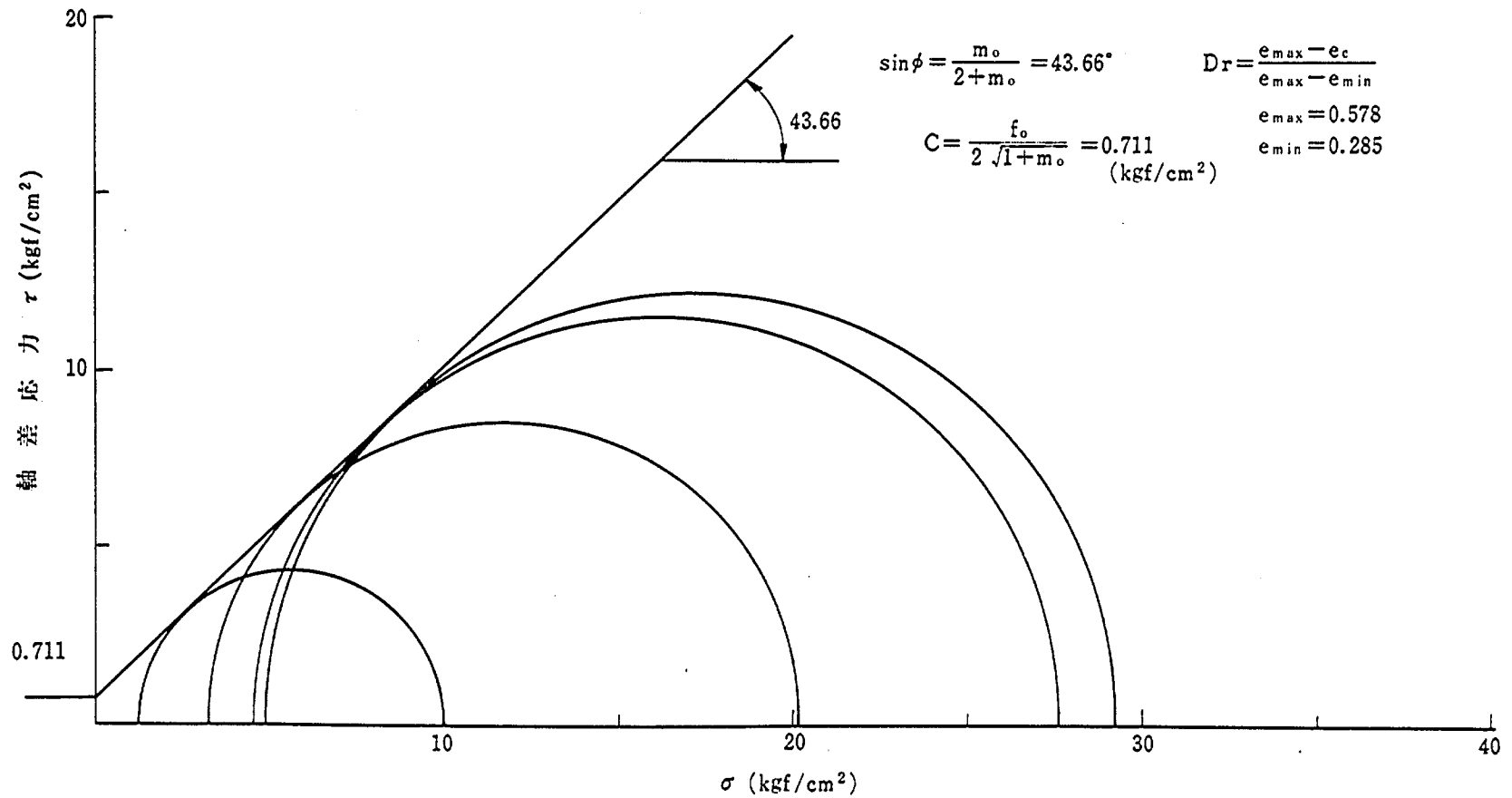


図 - 4.6(1) モールの応力円 (砂岩 II, 目標相対密度 Dr = 85%)

Dr [*] (圧密度) (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	ε_f (%)	ε_{vf} (%)	m _o	f _o
61	1.5	8.27	9.77	8.80	1.04	4.122	2.164
61	3.1	15.14	18.24	14.20	3.89		
62	4.1	18.94	23.04	15.00	5.99		
61	6.0	25.21	31.21	15.00	6.52		

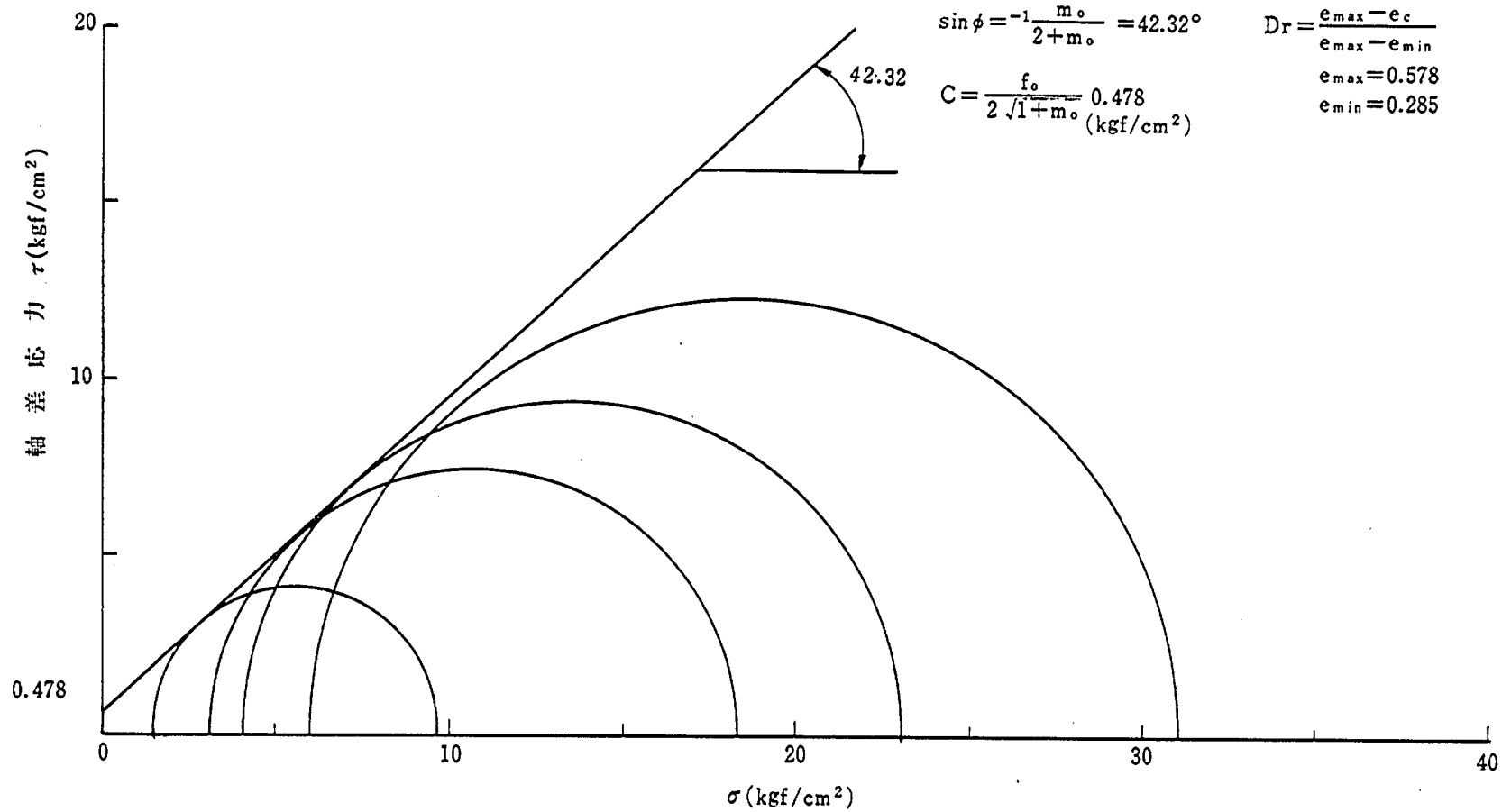


図 - 4.6(2) モールの応力円 (砂岩Ⅱ, 目標相対密度 $D_r = 61\%$)

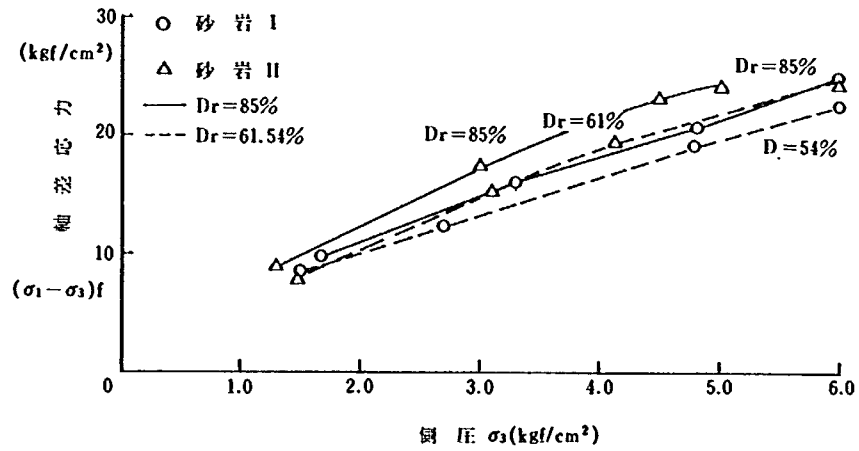


図 - 4.7 側圧と軸差応力の関係図

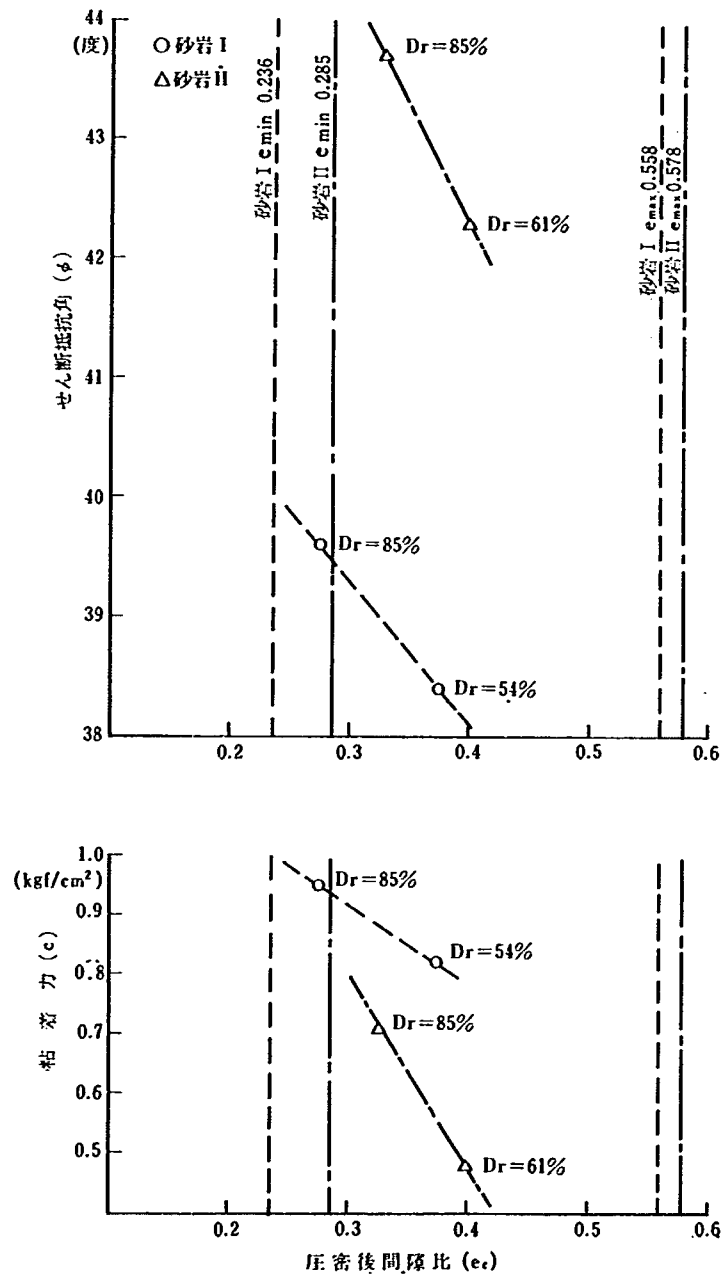


図 - 4.8 圧密後間隙比と内部摩擦角・粘着力の関係図

2) 変形性

応力・ひずみ曲線を図-4.9(1)(2)・図-4.10(1)(2)で見ると、最大軸差応力が軸ひずみ15%以内で現われないケースは、以下の通りである。

岩 種	砂岩 I		砂岩 II
相対密度 (%)	Dr = 85 %	Dr = 57 %	Dr = 61 %
側 圧 (kgf/cm ²)	6.0 kgf/cm ²	4.8・6.0 kgf/cm ²	4.1・6.0 kgf/cm ²

また、現われているケースでも、明確なピークは示していない。側圧毎の破壊時軸ひずみおよび体積ひずみを図-4.11に示した。

砂岩 I の Dr = 85 % で軸ひずみ 8 ~ 14 %，Dr = 57 % では 8 ~ 15 % で，砂岩 II の Dr = 85 % で 7 ~ 12 %，Dr = 61 % では 8 ~ 15 % と前半にピークを示している。

破壊時の体積圧縮量が圧縮から膨張に変化していないケースは上述の最大主応力差が，15 % 以内で表われていないケースと同じケースである。

以上で明確なピークは高密度で低側圧な状態で現われる傾向にあるといえる。

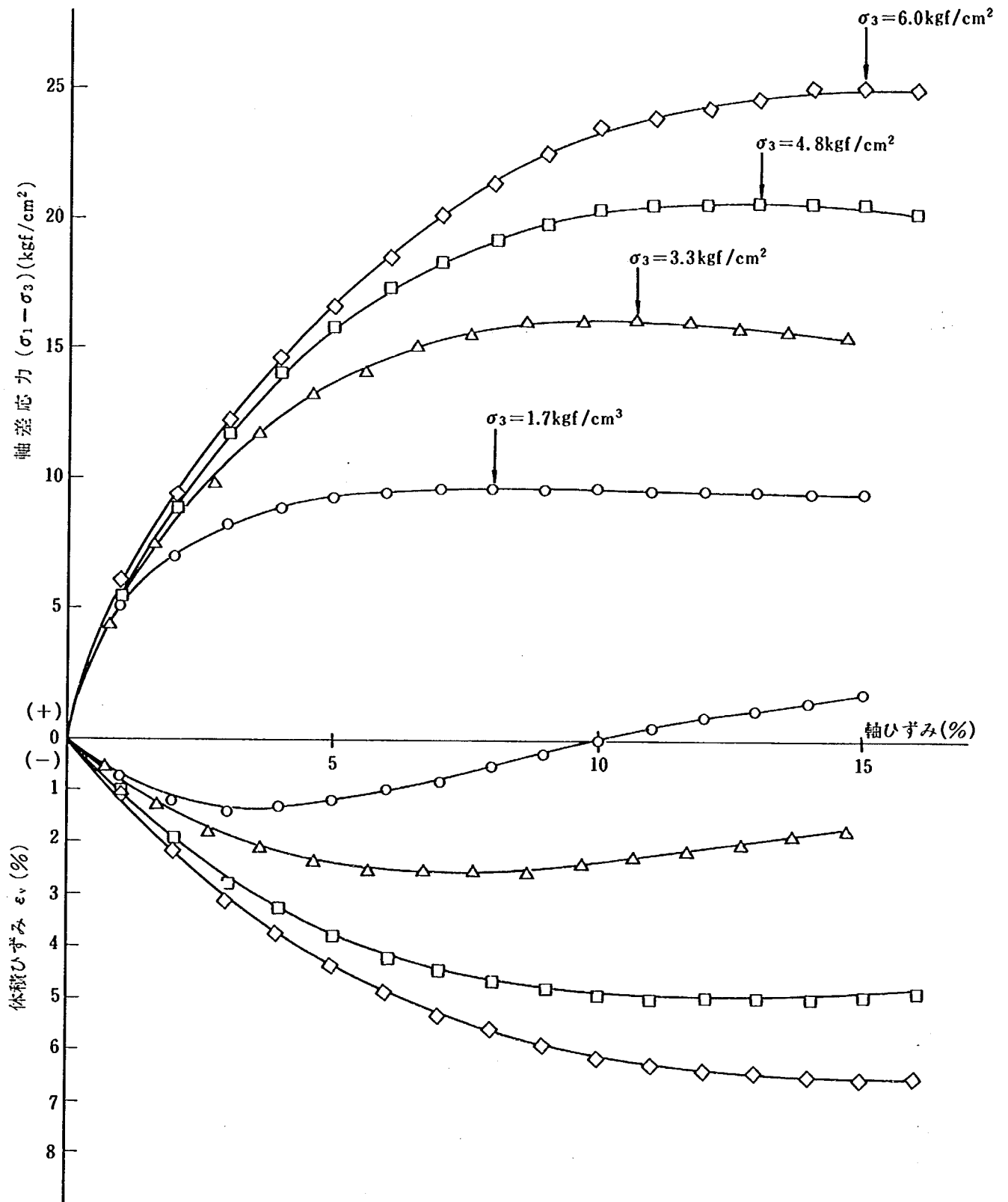


図 - 4.9 (1) 応力～ひずみ曲線 (砂岩 I・Dr=85%)

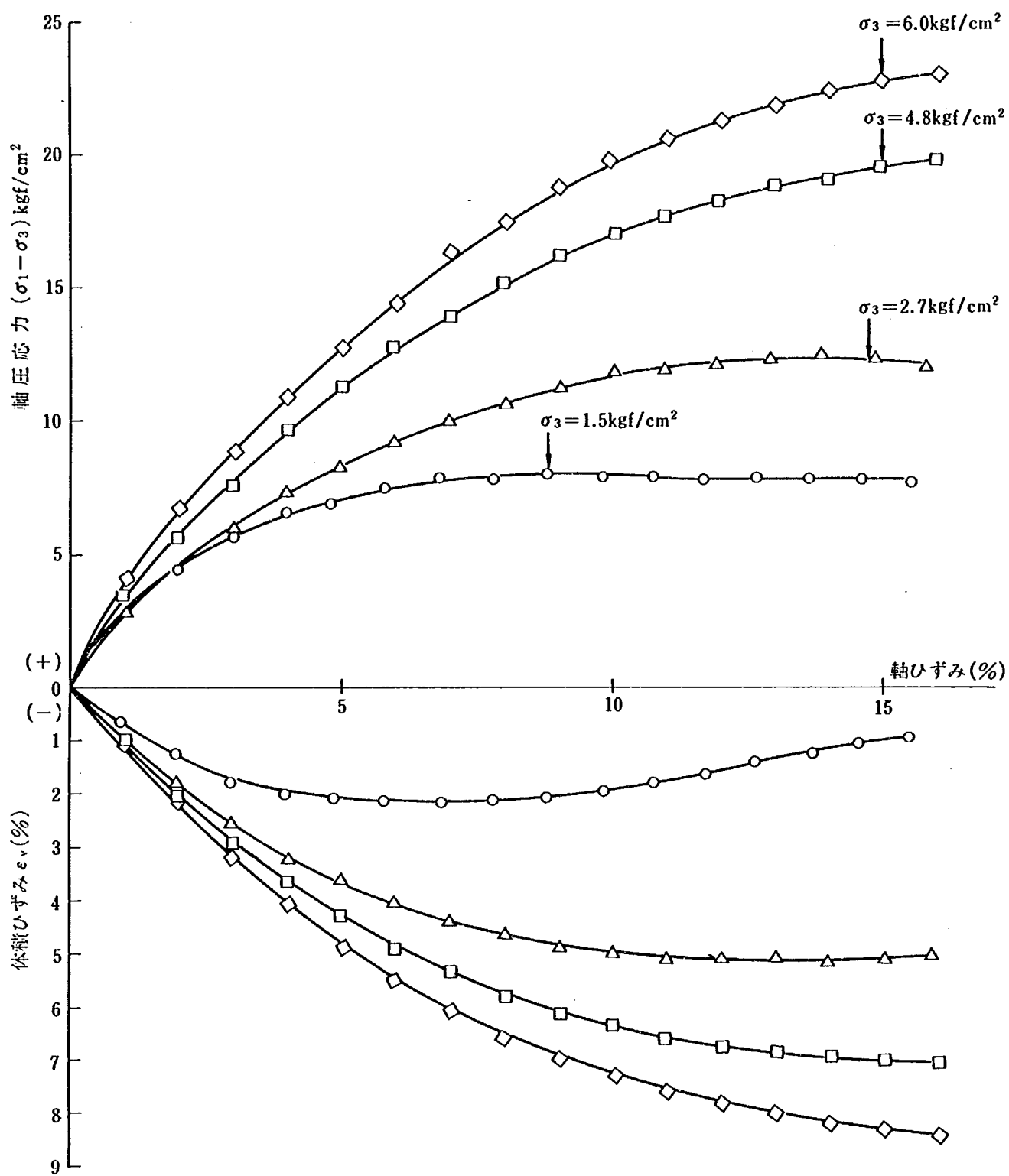


図 - 4.9(2) 応力～ひずみ曲線 (砂岩 I・Dr = 54%)

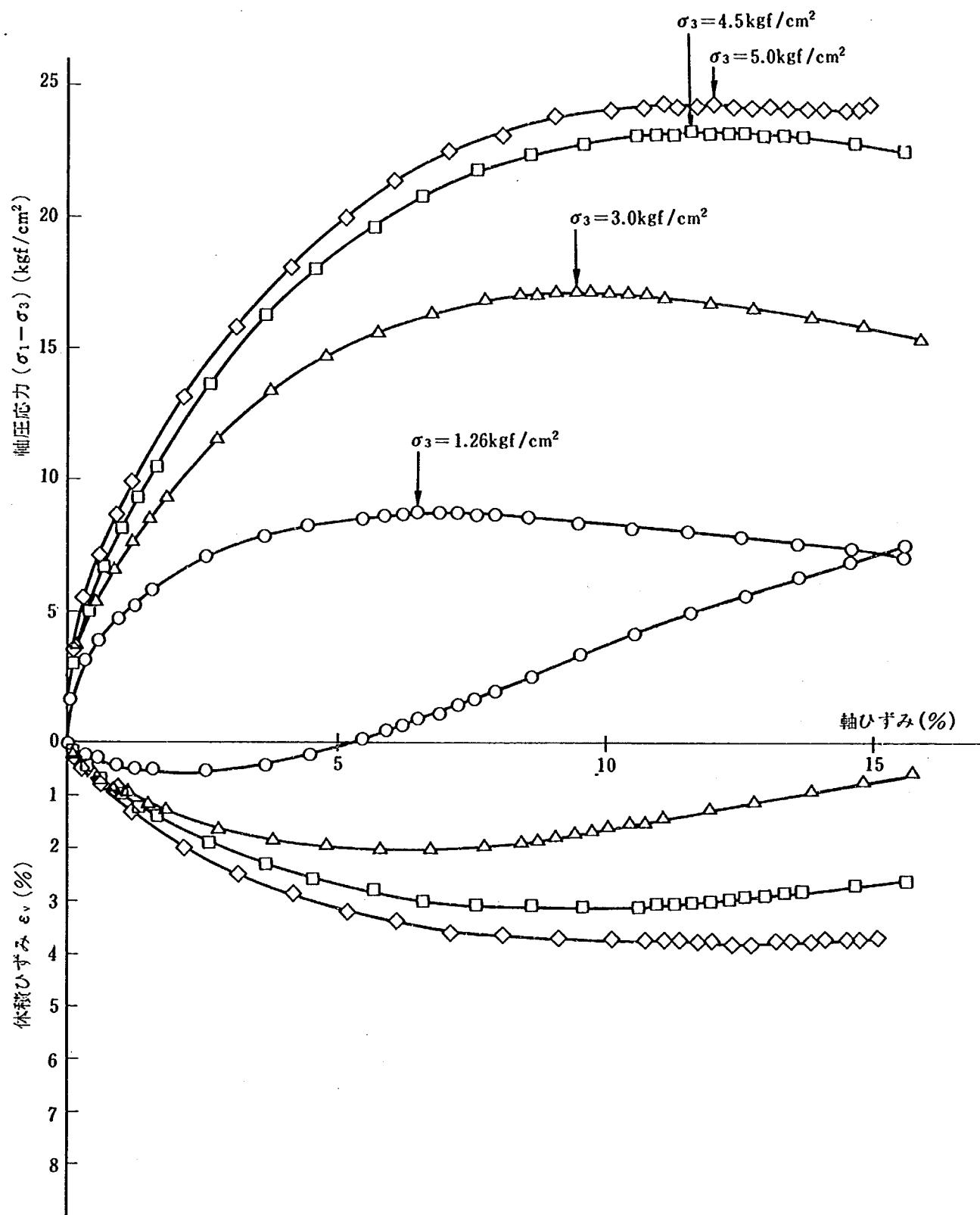


図 - 4. 10 (I) 応力～ひずみ曲線 (砂岩 II ・ Dr = 85%)

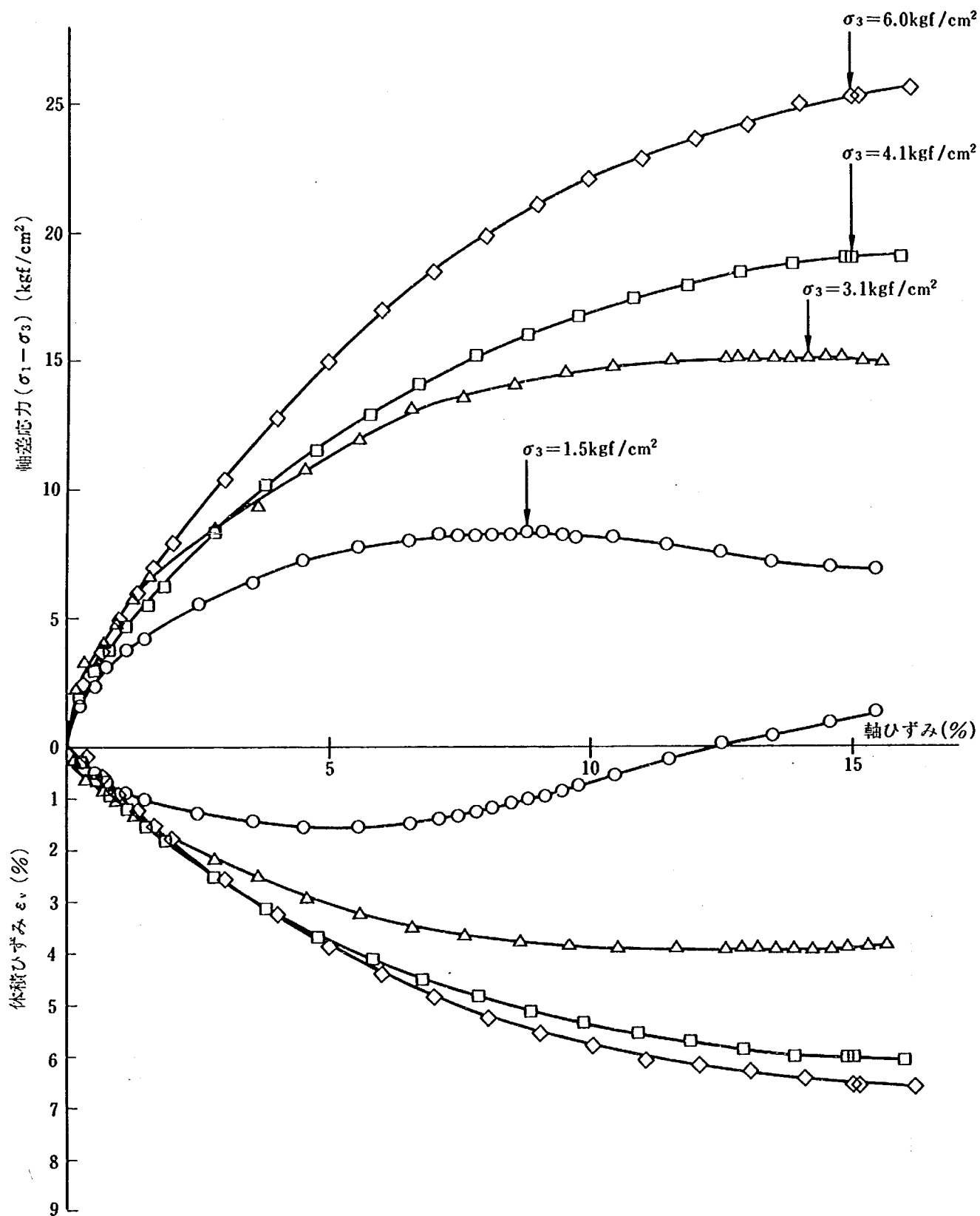


図 - 4.10 (2) 応力～ひずみ曲線 (砂岩 II ・ $Dr = 61\%$)

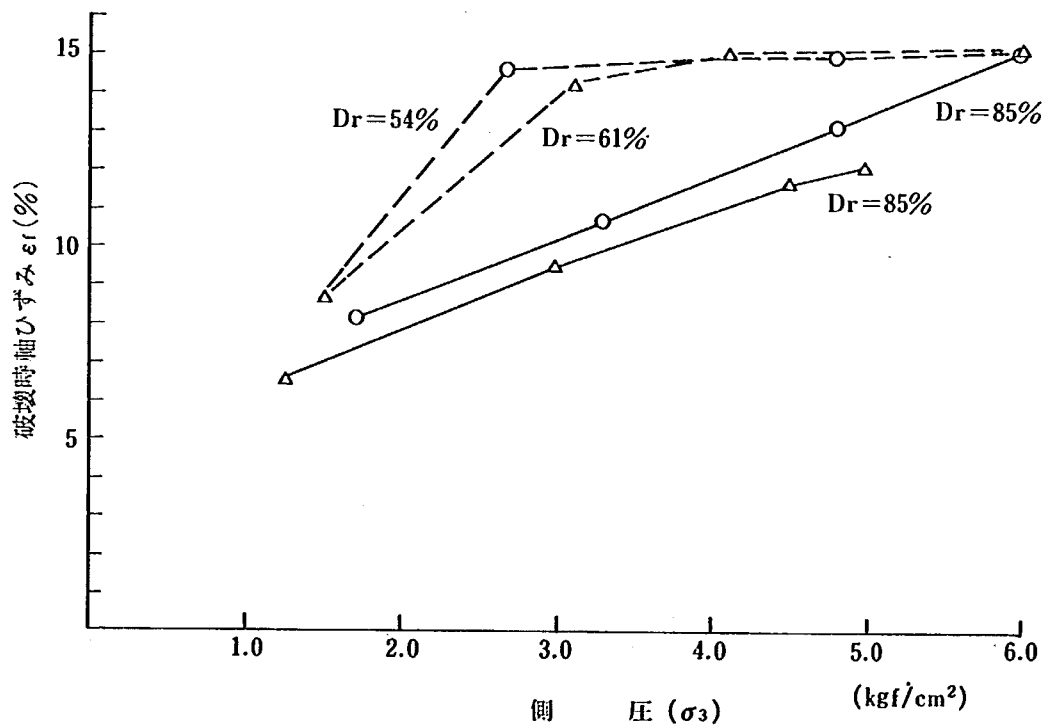
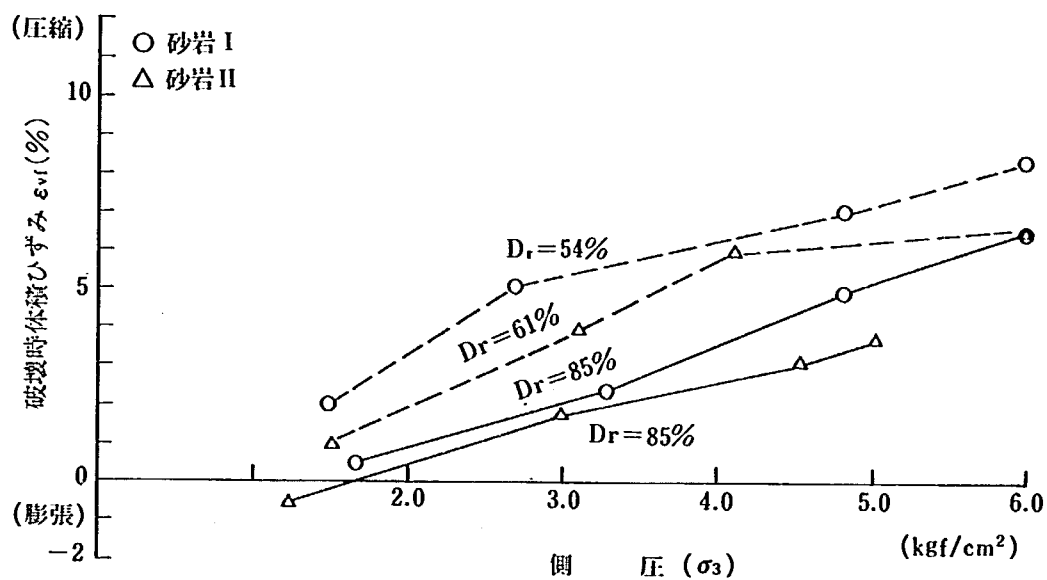


図 - 4. 11 側圧毎の破壊時軸ひずみおよび体積ひずみ

変形係数 E_{50} と側圧の関係を図 - 4. 12 で見ると、良く締固まったケースでの係数が大きく、側圧による差は顕著には現われていない。岩種別による差は、砂岩 II の値が大きく現われる傾向を示している。側圧と変形係数 E_r の関係を図 - 4. 13 で見ると砂岩 II の $Dr = 85\%$ 以外の 3 ケースでは、側圧値 ($\sigma_3 = 6.0 \text{ kg/cm}^2$) に近づくに従い変形係数 E_r は同じ値に近づく傾向にある。

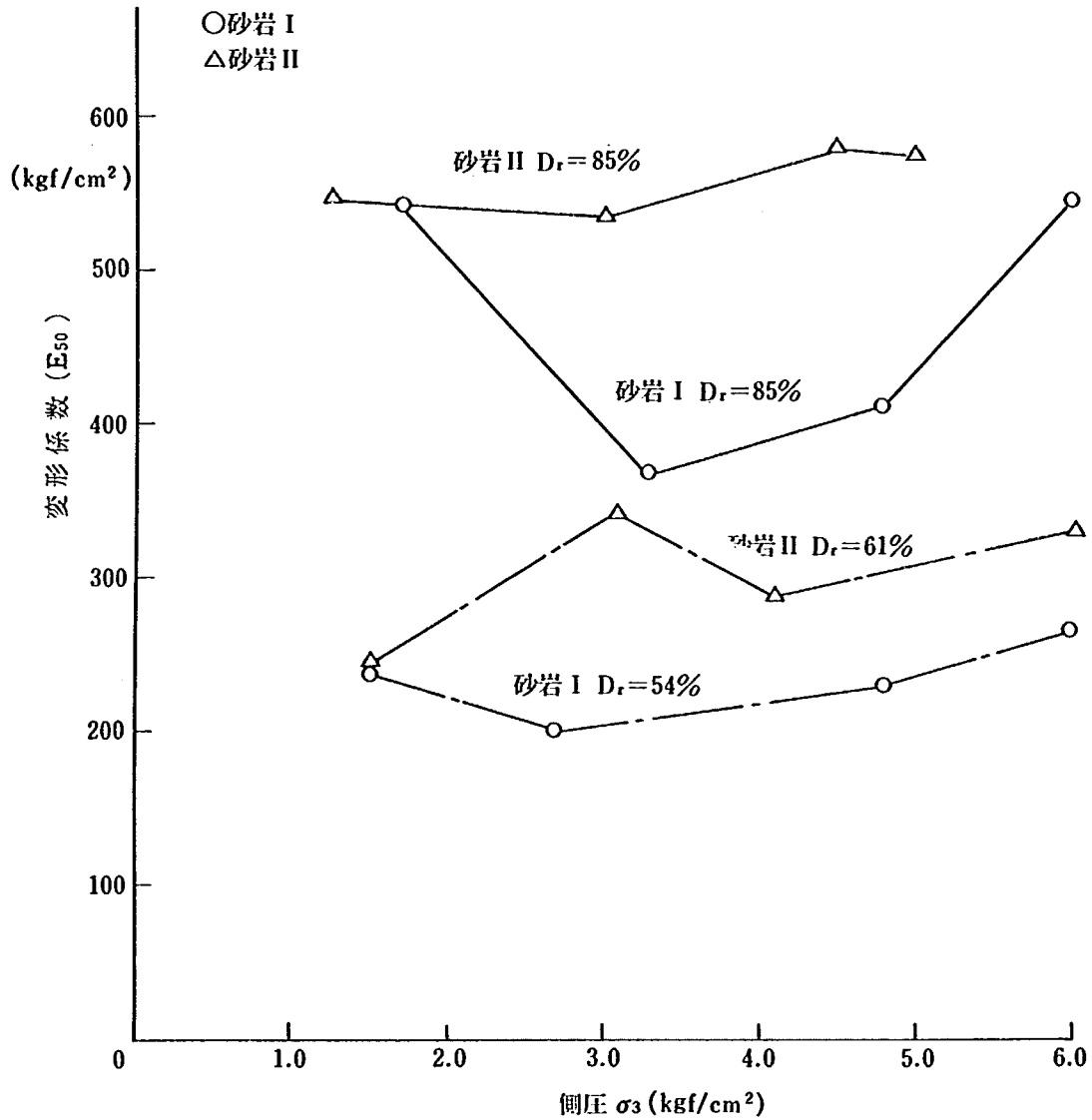


図 - 4.12 側圧と変形係数 E_{50} の関係図 (砂岩 I・II)

なお、変形係数 E_{50} および E_f の値は下記の定義により求めたものである。

$$E_{50} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{50}}{\epsilon_{50}}$$

$$E_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\epsilon_f}$$

ここに、

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 最大主応力差

ϵ_f : $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の現われた軸ひずみ

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{50}$: $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$

ϵ_{50} : $(\sigma_1 - \sigma_3)_{50}$ の現われた軸ひずみ

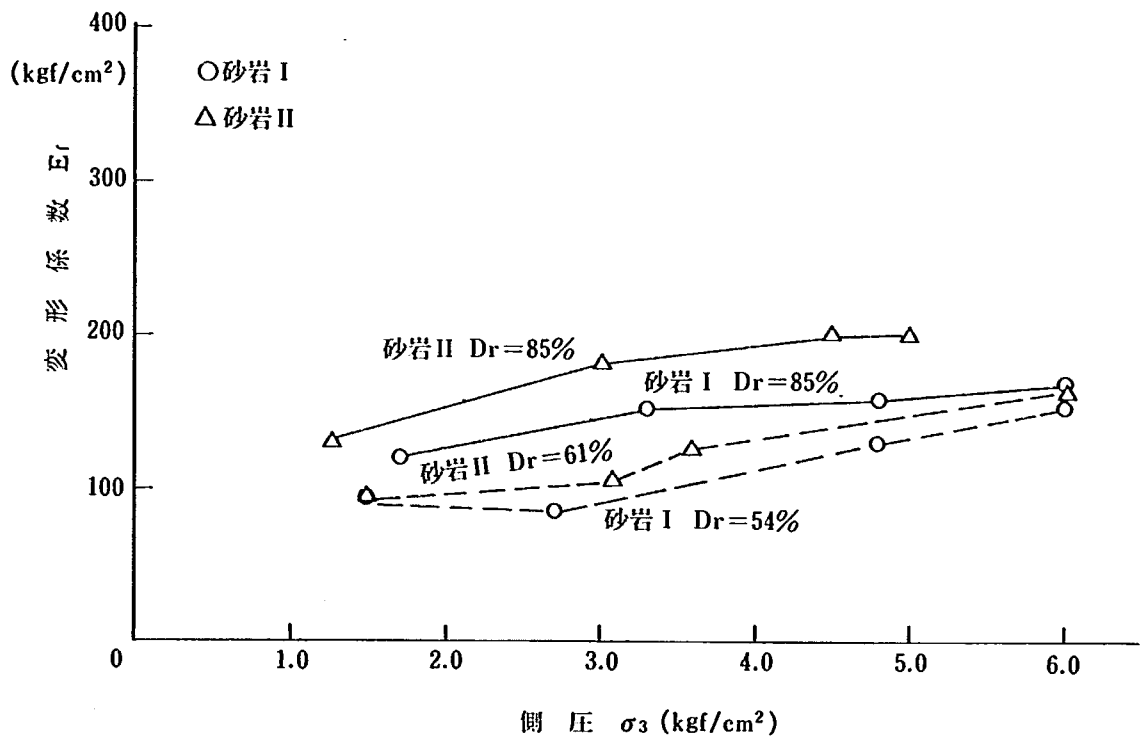


図 - 4.13 側圧と変形係数 E_r の関係図 (砂岩 I・II)

3) 粒子破碎率

破碎率と最大主応力差の関係を図 - 4.14 で見ると明確ではないが主応力差の増加に伴ない破碎率は増加の傾向にあり，側圧が小さなものより大きな方が破碎率が大きくなる傾向にある。以下に破碎を示した。

なお，大型三軸圧縮試験後の粒度曲線と粒径別破碎率の状態を図 - 4.15 から図 - 4.18 に示した。

砂岩 I	{ Dr = 85 %	6.9 ~ 13.1 %
	{ Dr = 54 %	5.2 ~ 11.1 %
砂岩 II	{ Dr = 85 %	4.8 ~ 15.1 %
	{ Dr = 61 %	5.1 ~ 8.6 %

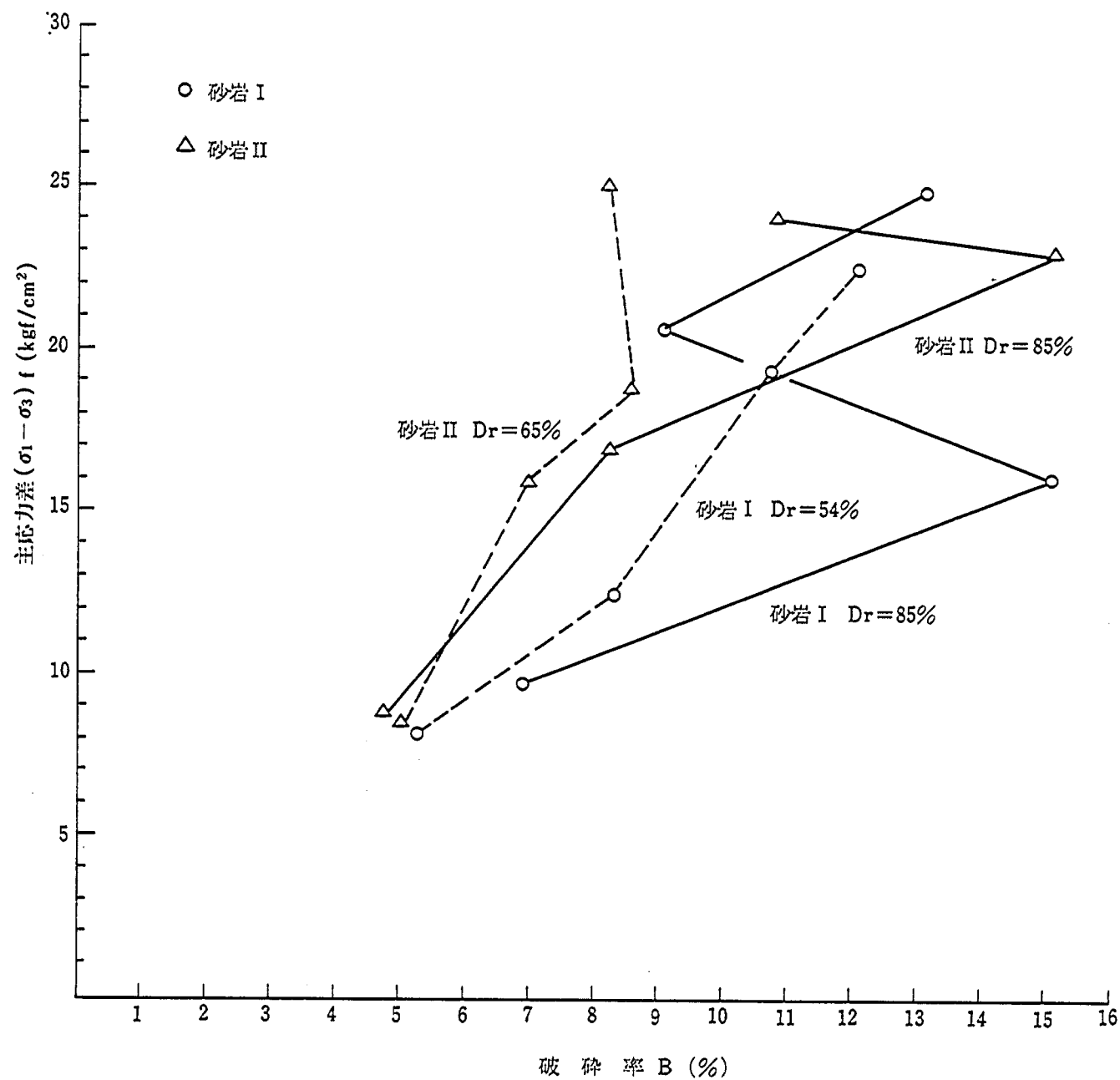


図 - 4. 14 破砕率と主応力差の関係図 (砂岩 I・II)

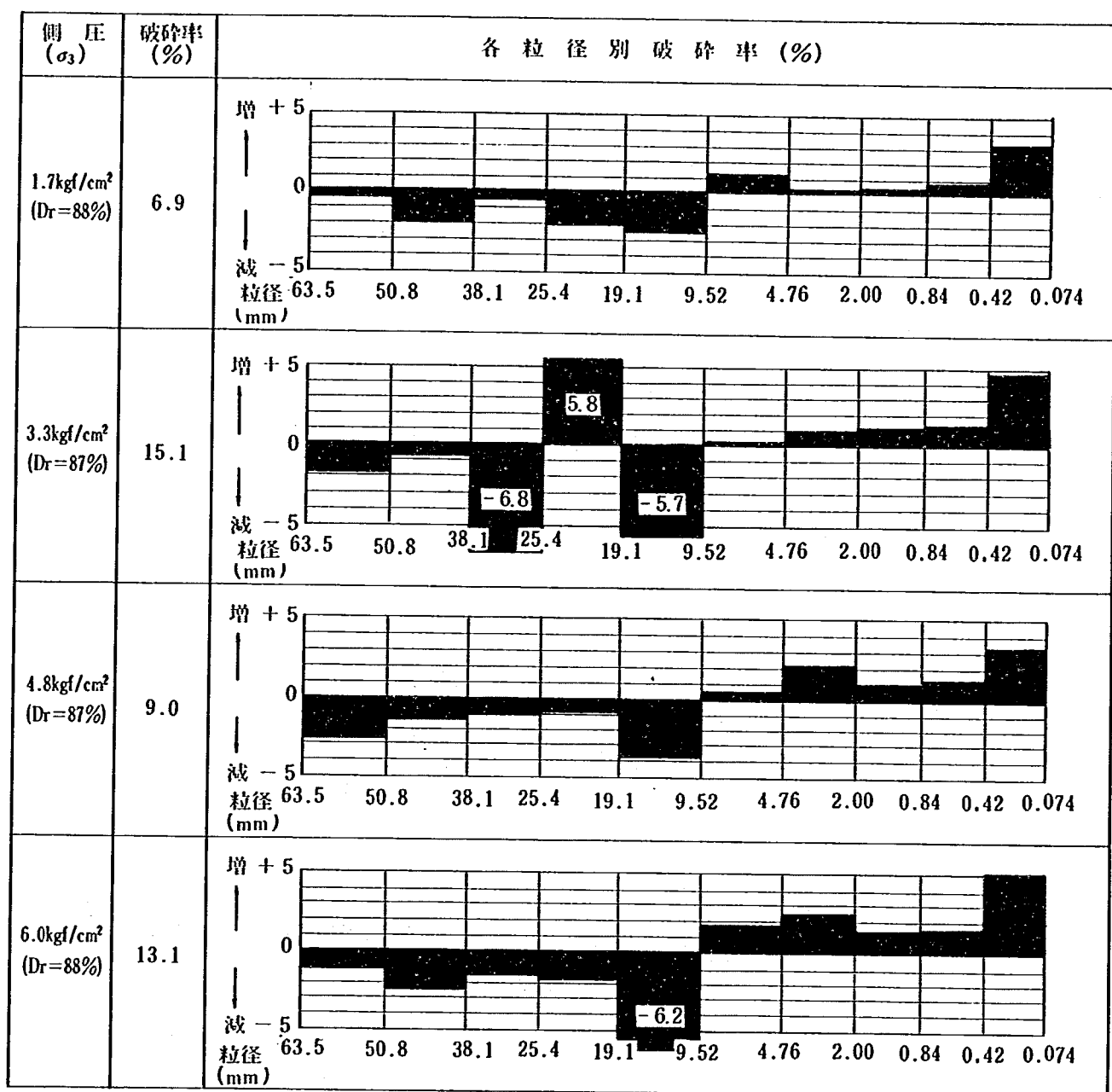


図 - 4. 15 (1) 三軸後粒度試験 (砂岩 I • Dr=85%)

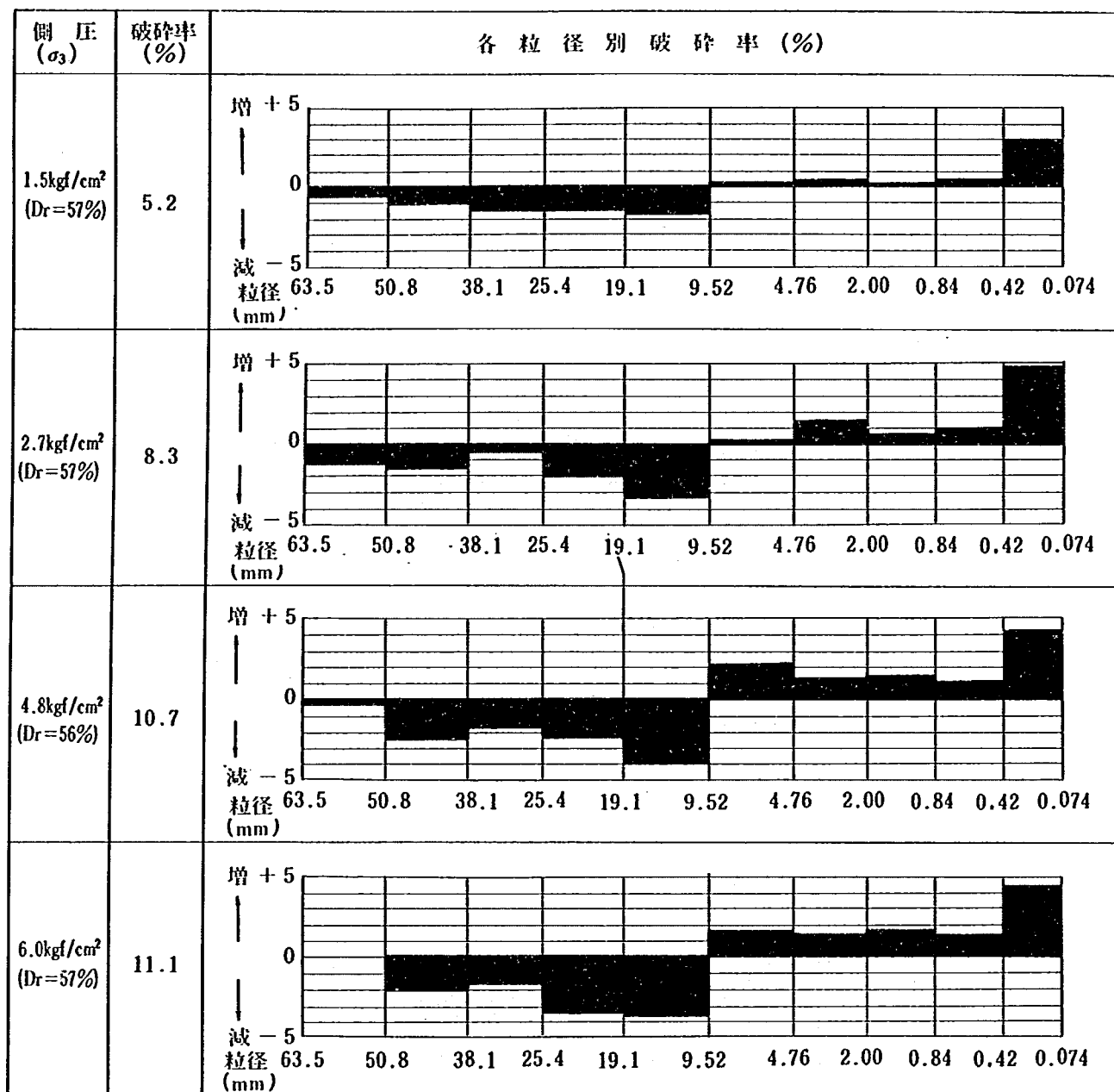


図 - 4. 15 (2) 三軸後粒度試験 (砂岩 I • Dr = 54%)

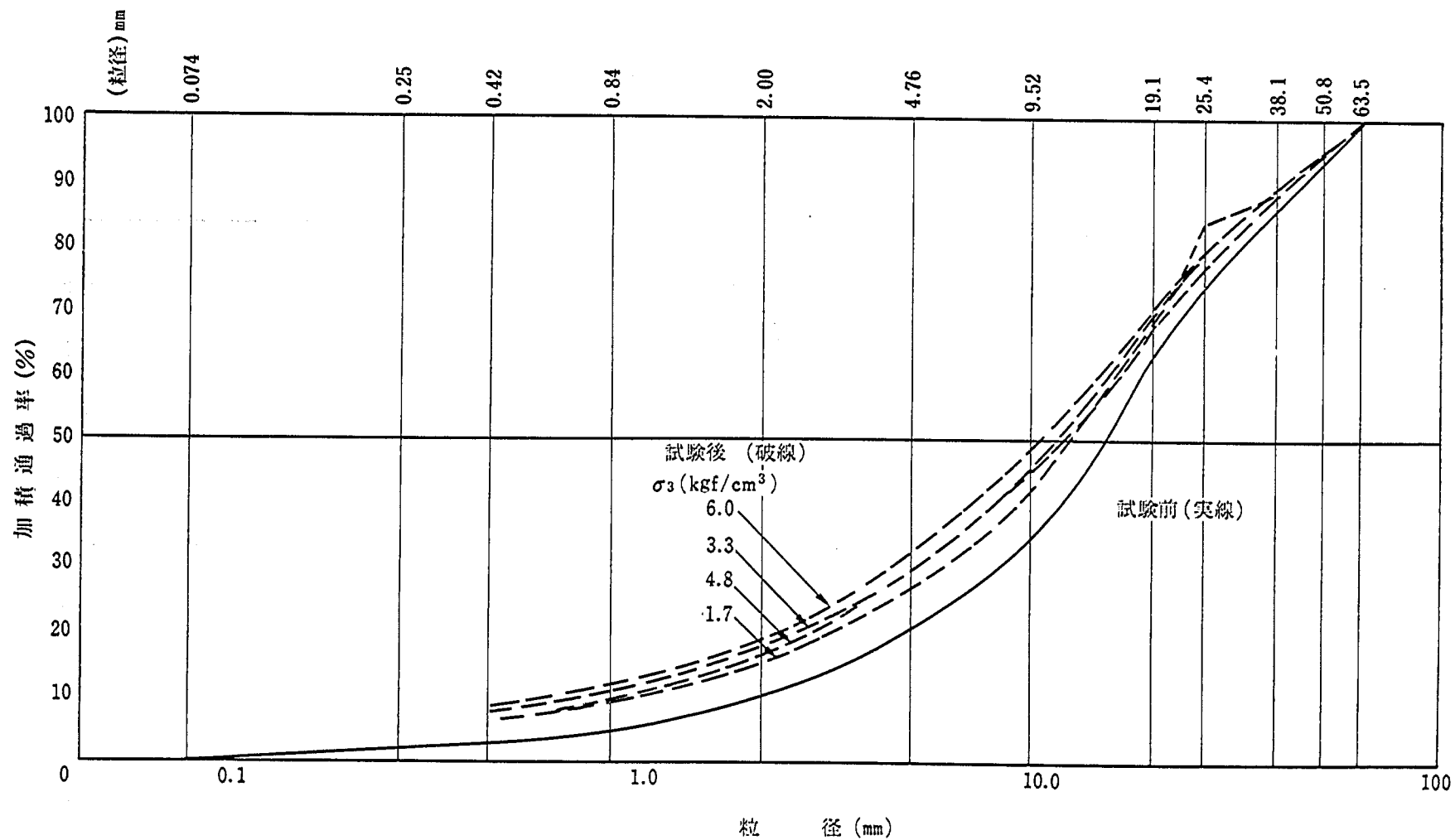


図 - 4.16(1) 三軸試験前後の加積通過曲線 (砂岩 I · $D_r = 85\%$)

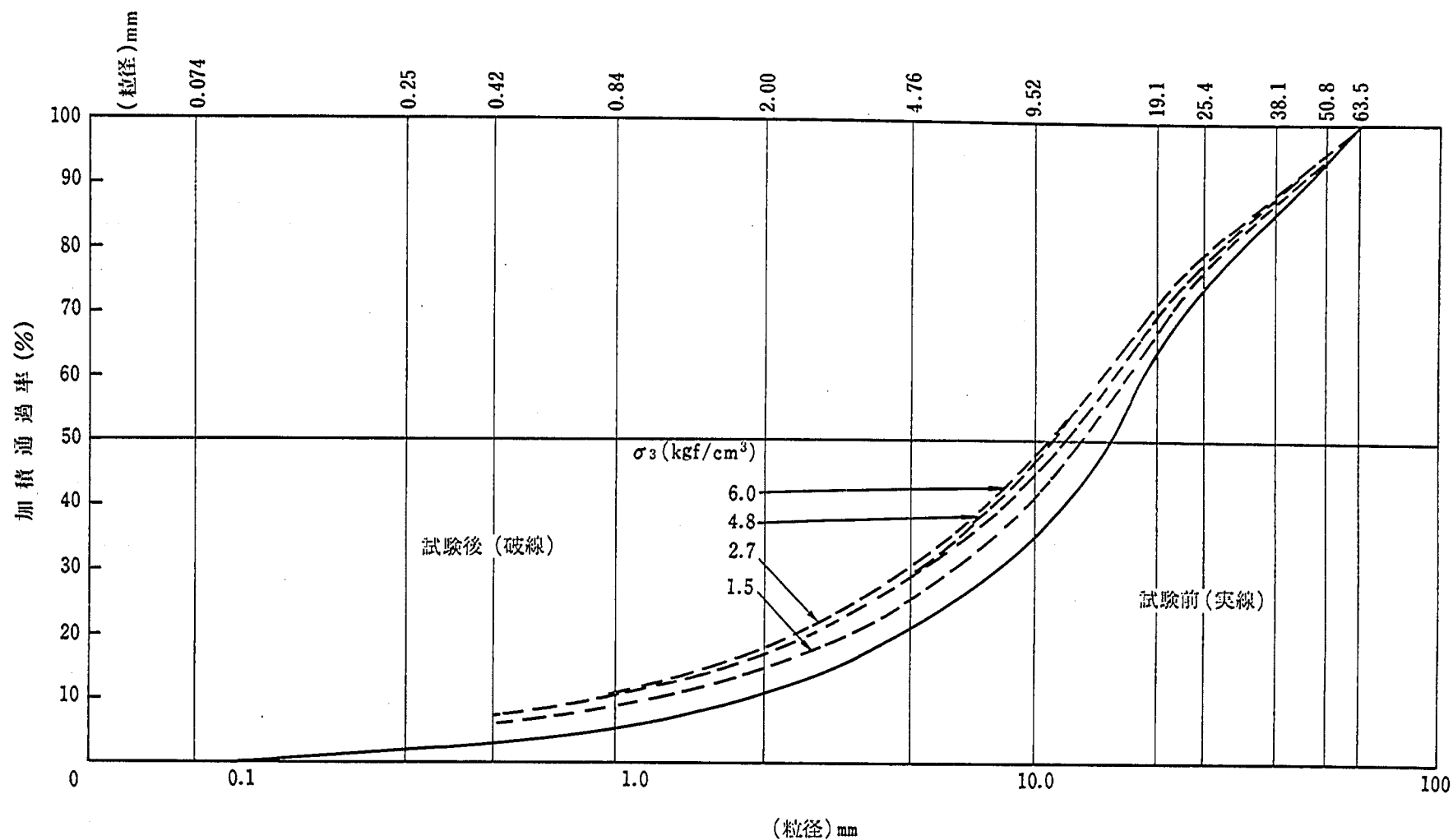


図 - 4. 16 (2) 三軸試験前後の加積通過曲線 (砂岩 I • $D_r = 54\%$)

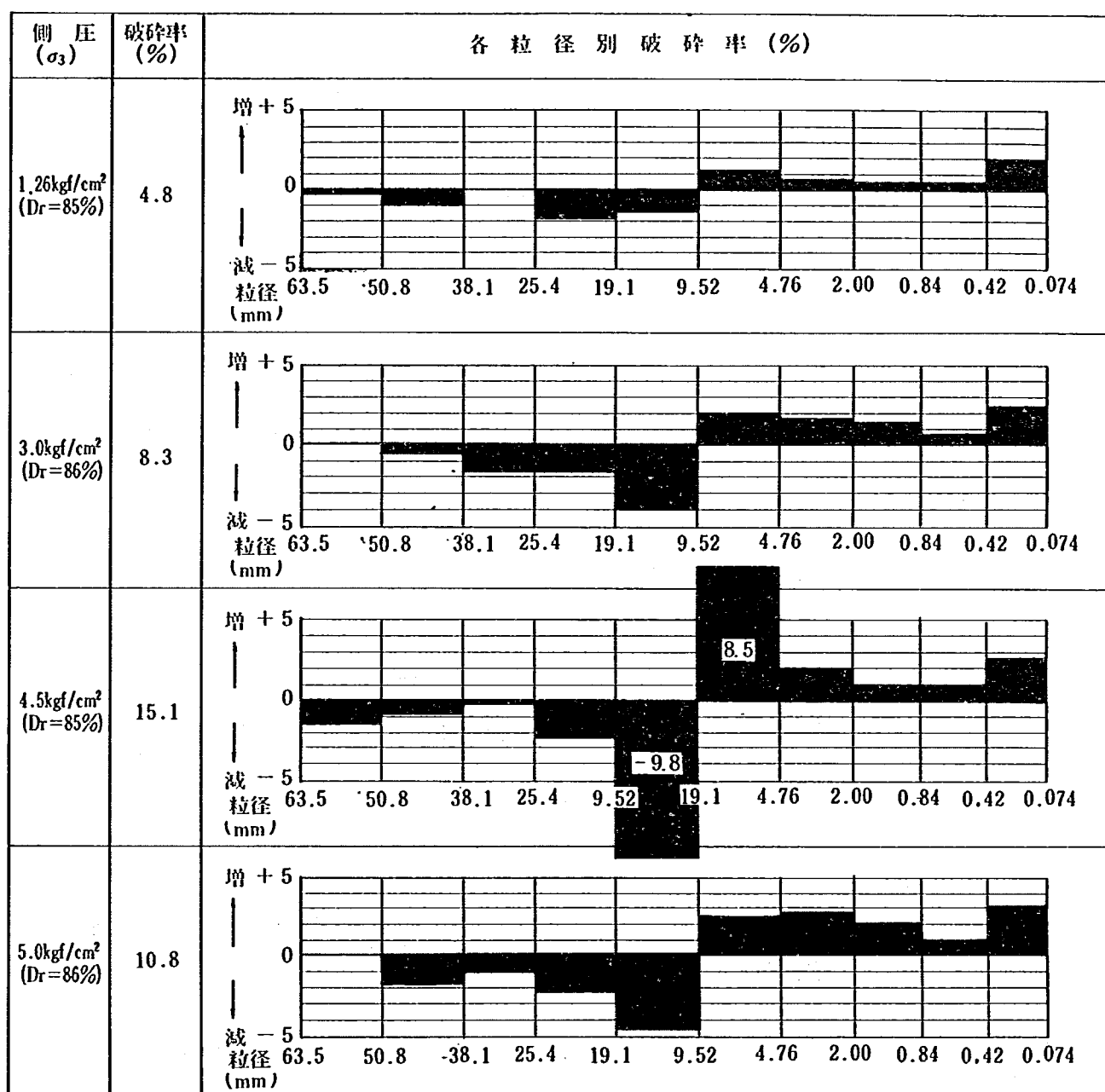


圖 - 4. 17 (I) 三軸後粒度試驗 (砂岩 II · Dr=85%)

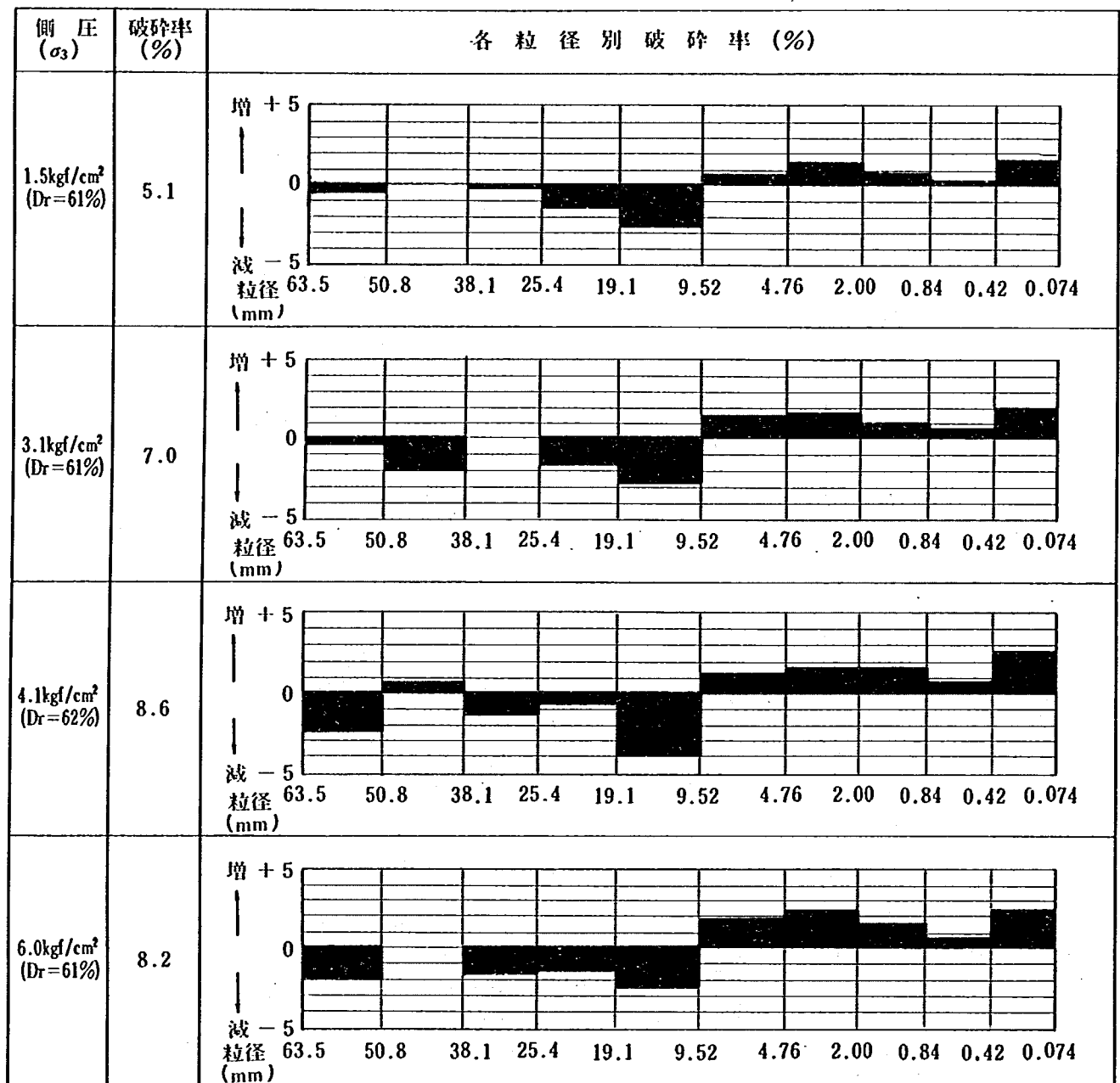


図 - 4. 17 (2) 三軸後粒度試験 (砂岩Ⅱ・Dr=61%)

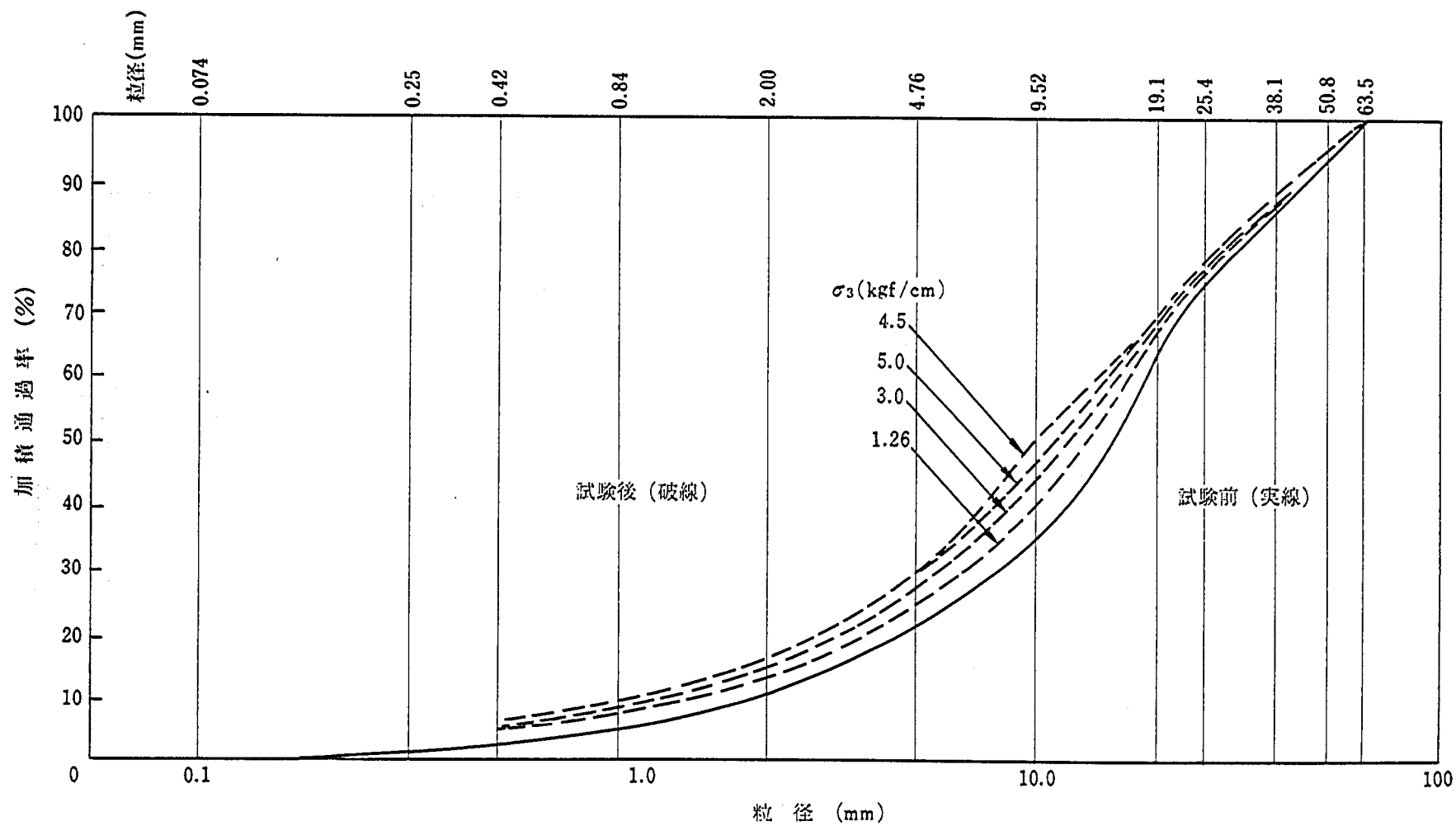


図 - 4.18(1) 三軸試験前後の加積通過曲線 (砂岩Ⅱ・ $D_r=85\%$)

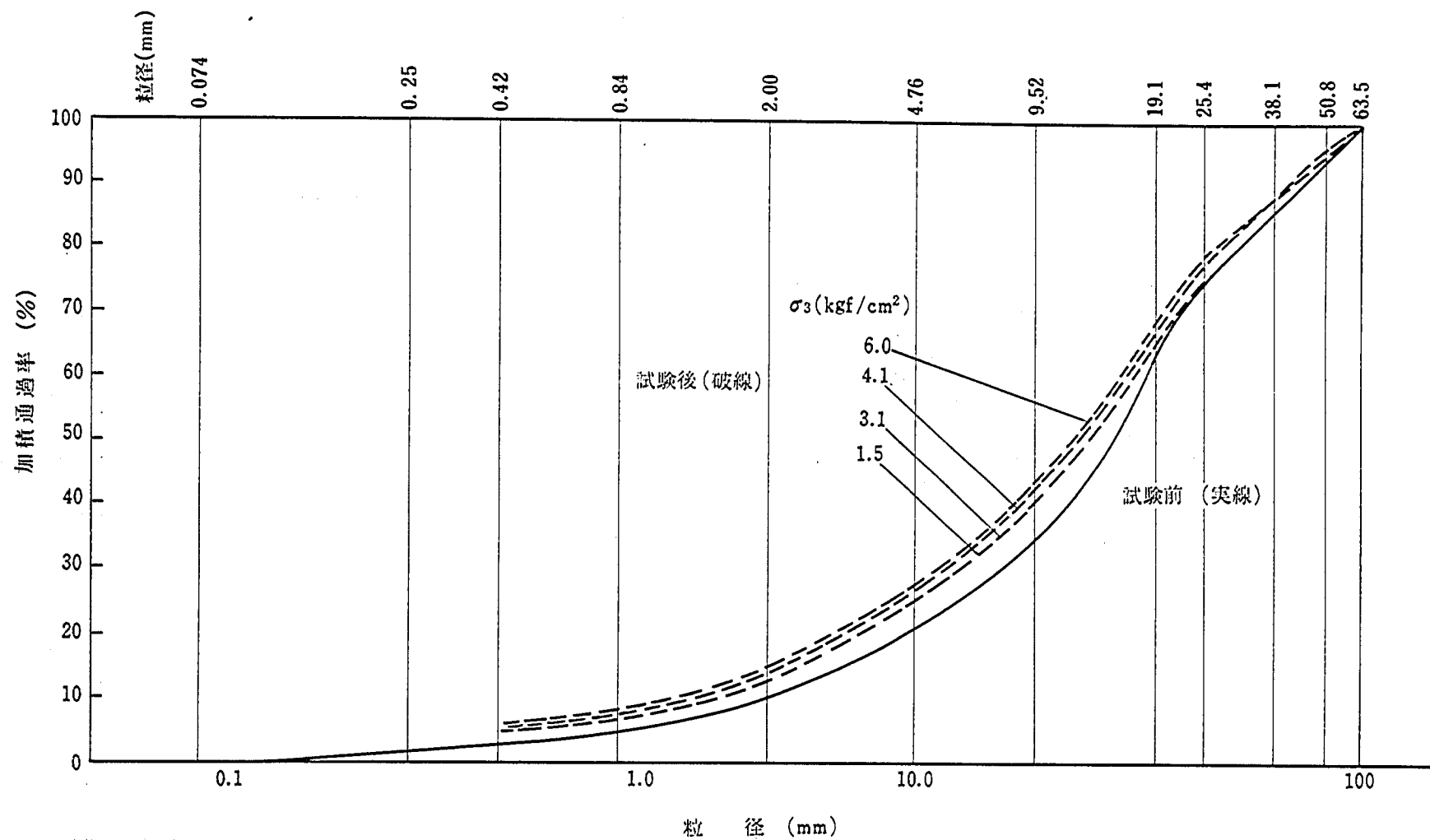


図 - 4.18 (2) 三軸試験前後の加積通過曲線 (砂岩 II · Dr = 61%)

4.3.2 輝緑凝灰岩

1) 強度定数

不飽和試験でのモールの応力円を図-4.19で見ると、せん断抵抗角 ϕ_d 42.34度、粘着力 C_d 1.162 kgf/cm² である。飽和試験でのモールの応力円を図-4.20で見ると、せん断抵抗角 ϕ_d 39.41度、粘着力 C_d 0.519 kgf/cm² である。以上よりせん断抵抗角に着目すると不飽和に比較して飽和状態の方が約3度の強度低下が現われている。なおモールの応力円と最小二乗法より求めた破壊時包絡線とは、全て直線で接している。また飽和試験により、長期载荷試験終了後供試体を飽和状態で三軸圧縮試験し、そのモールの応力円を図-4.21で見ると、せん断抵抗角 ϕ_d は45.21度、粘着力 C_d は0.174 kgf/cm² と内部摩擦角は大きな値となり、粘着力は小さくなった。また新鮮材料を用いて行った飽和試験時の包絡線にはモールの応力円は接していない。これは長期载荷によるせん断強度低下によるものか、低側圧ではこのような傾向にあるのかは今後、飽和試験数量を増し明確にする必要がある。また、最大主応力差を飽和と不飽和で比較してみると、飽和の方が不飽和に比較して $\sigma_3 = 6$ kgf/cm² で約23%、 $\sigma_3 = 1$ kgf/cm² で約40%の低下が現われており、低側圧の方がその低下率が大きな傾向にある。長期载荷試験後の値を前述の飽和試験結果の外挿値と比較すると低くなっており、側圧が小さくなるに従ってその差が大きくなる傾向にある。

2) 変形性

応力とひずみ曲線を図-4.23(1)~(3)で見ると軸差応力の最大値は15%以内で全ケース現われている。最大値は不飽和試験で明確に現われているが飽和では不明確なピークであり、長期载荷試験では更に不明確に近い状態である。ピークの現われる所の軸ひずみは不飽和試験では5.70~9.57%、飽和では8.38~12.48%、長期圧密後でも6.08~8.30% 内で現われている。体積ひずみも全ケースで圧縮から膨張に変化し、不飽和試験で明確であり、側圧が低いほどその傾向が明確である。長期载荷後の場合にも試験側圧が大きな方より小さい方がその傾向が顕著に現われている。図-4.24に側圧と破壊時軸ひずみおよび破壊時体積ひずみの関係を示す。

Dr^* (圧密後) (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	ε_t (%)	ε_{vf} (%)	m_o	f_o
93	1.00	8.94	9.94	5.70	-1.13	4.127	5.260
99	2.00	13.85	15.85	7.02	0.00		
99	4.05	22.43	26.48	8.60	1.47		
100	6.01	29.72	35.73	9.57	2.07		

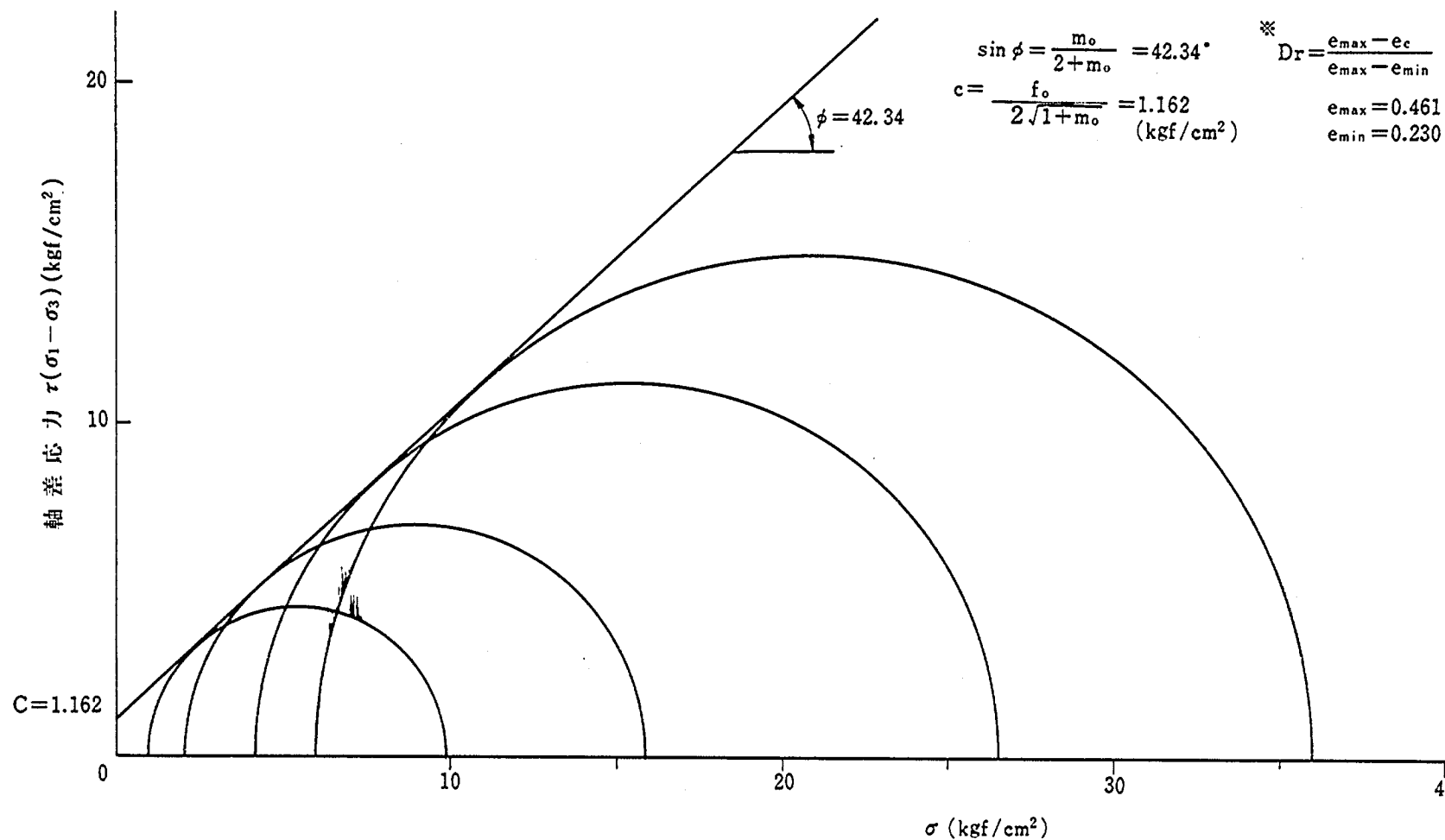


図 - 4. 19 モールの応力円 (輝緑凝灰岩, 不飽和状態・ $Dr = 85\%$)

Dr [*] (圧密後) (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	ϵ_f (%)	ϵ_{vf} (%)	m_o	f_o
89	1.04	5.59	6.63	7.35	1.12	3.477	2.195
93	2.00	9.44	11.44	9.68	2.16		
97	4.00	16.07	20.07	11.42	3.27		
100	6.00	23.02	29.02	12.48	3.66		

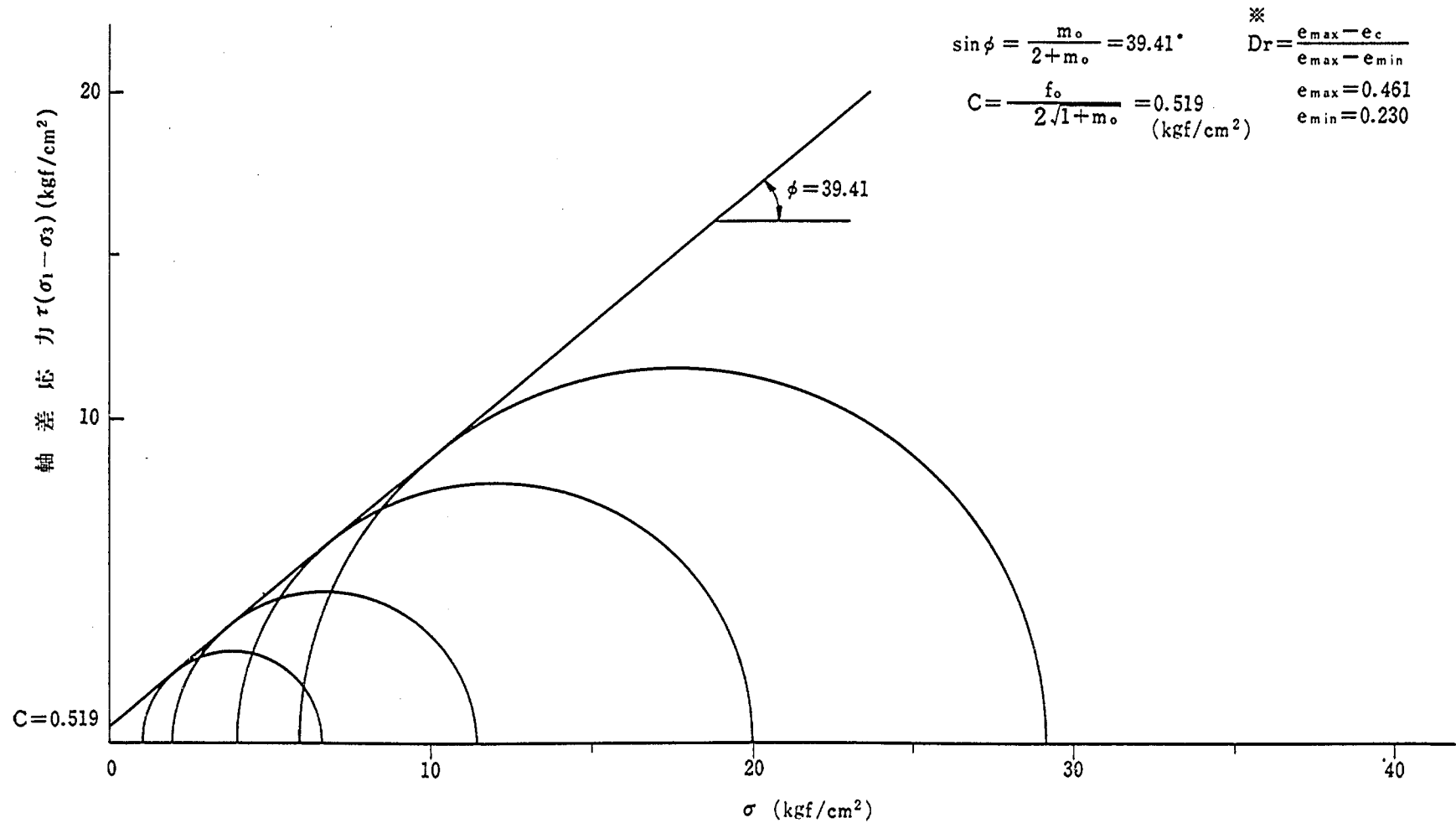


図 - 4. 20 モールの応力円 (輝緑凝灰岩, 飽和状態・Dr=85%)

Dr^* (圧密後) (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	ε_f (%)	ε_{vf} (%)	m_o	f_o
100	0.61	3.83	4.44	8.30	1.27	4.889	0.848
87	0.25	2.07	2.32	6.08	-1.36		

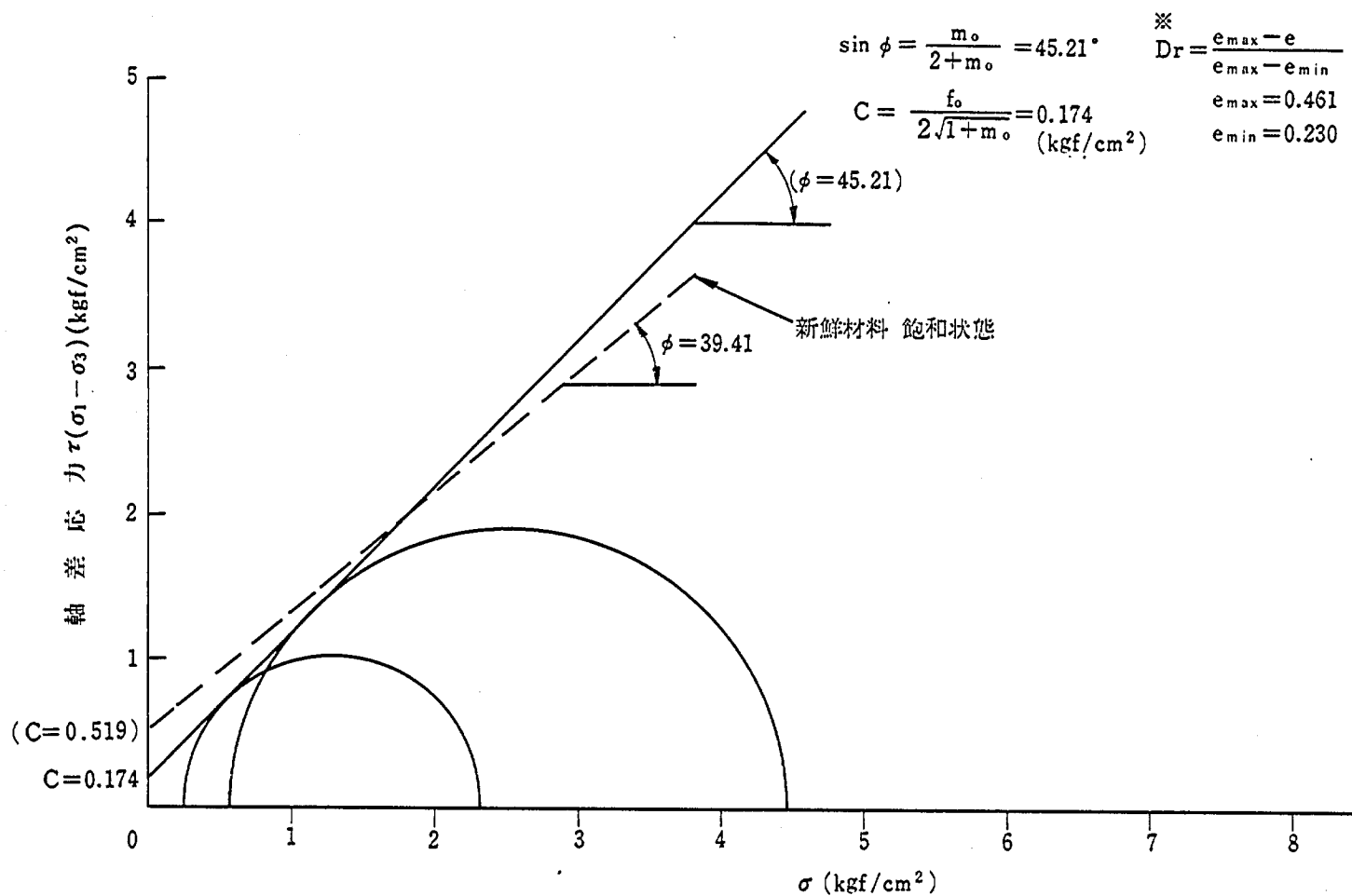


図 - 4.21 モールの応力円 (輝緑凝灰岩, 長期載荷後・ $Dr = 85\%$)

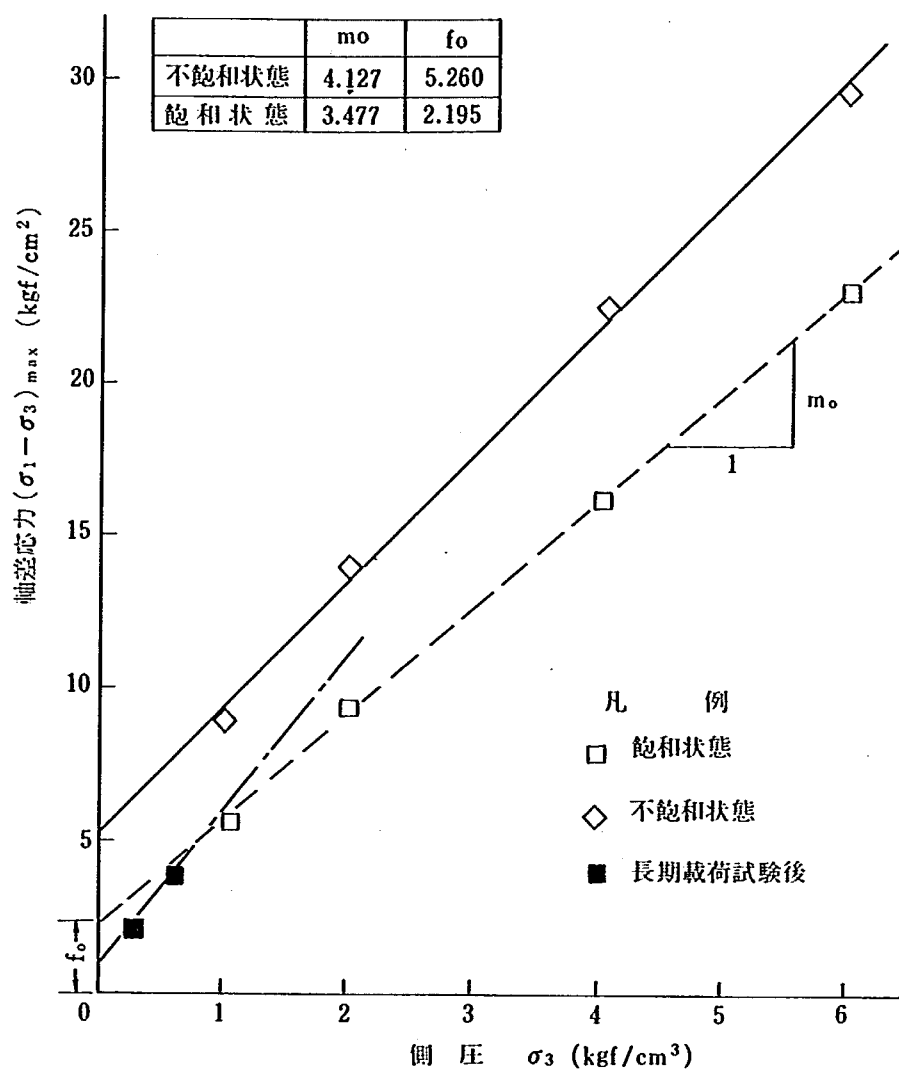


図 - 4.22 側圧と軸差応力の関係図 (輝緑凝灰岩)

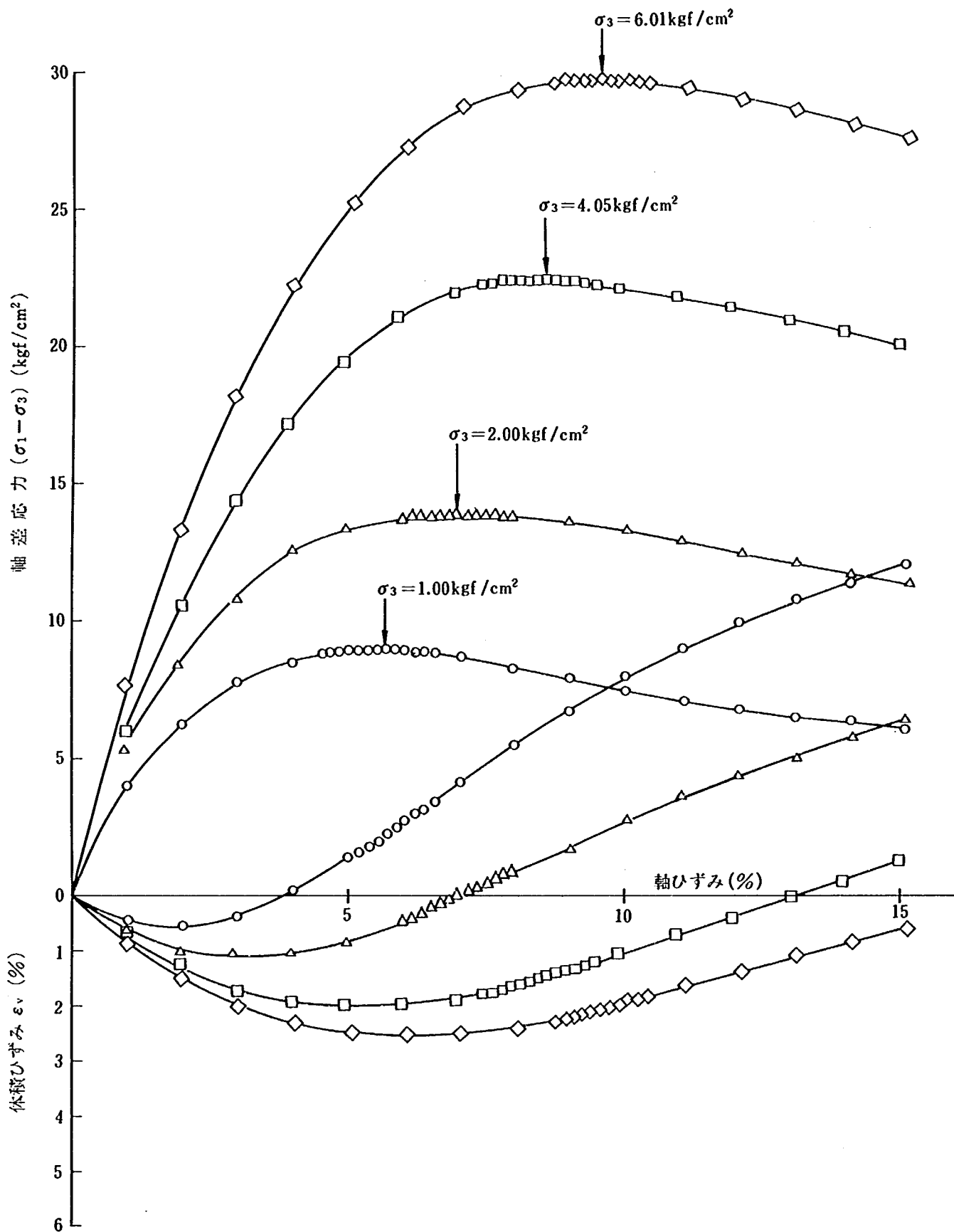


図 - 4. 23 (1) 応力～ひずみ曲線 (輝綠凝灰岩, 不飽和・Dr=85%)

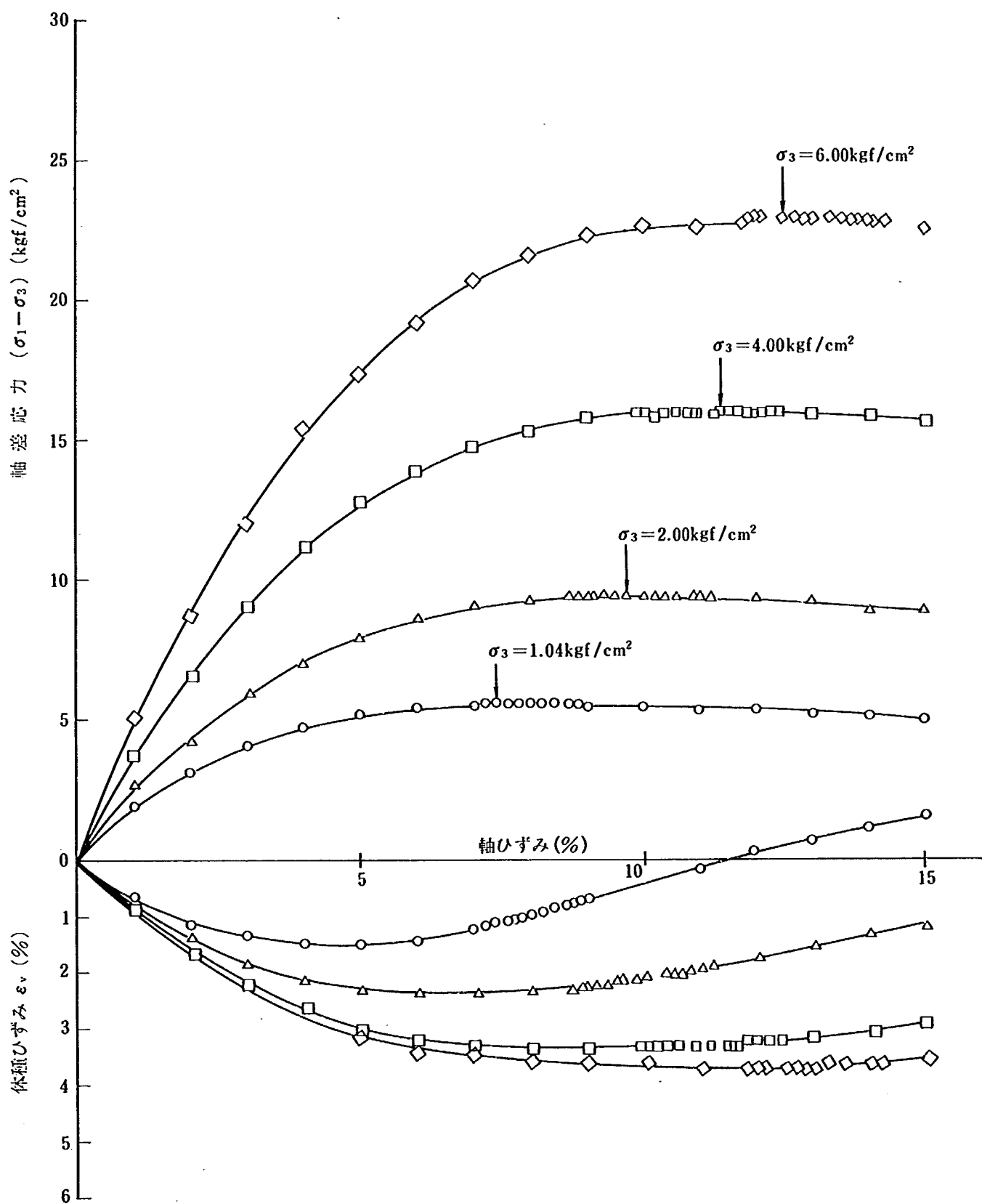


図 - 4. 23 (2) 応力～ひずみ曲線 (輝綠凝灰岩, 飽和・Dr = 85%)

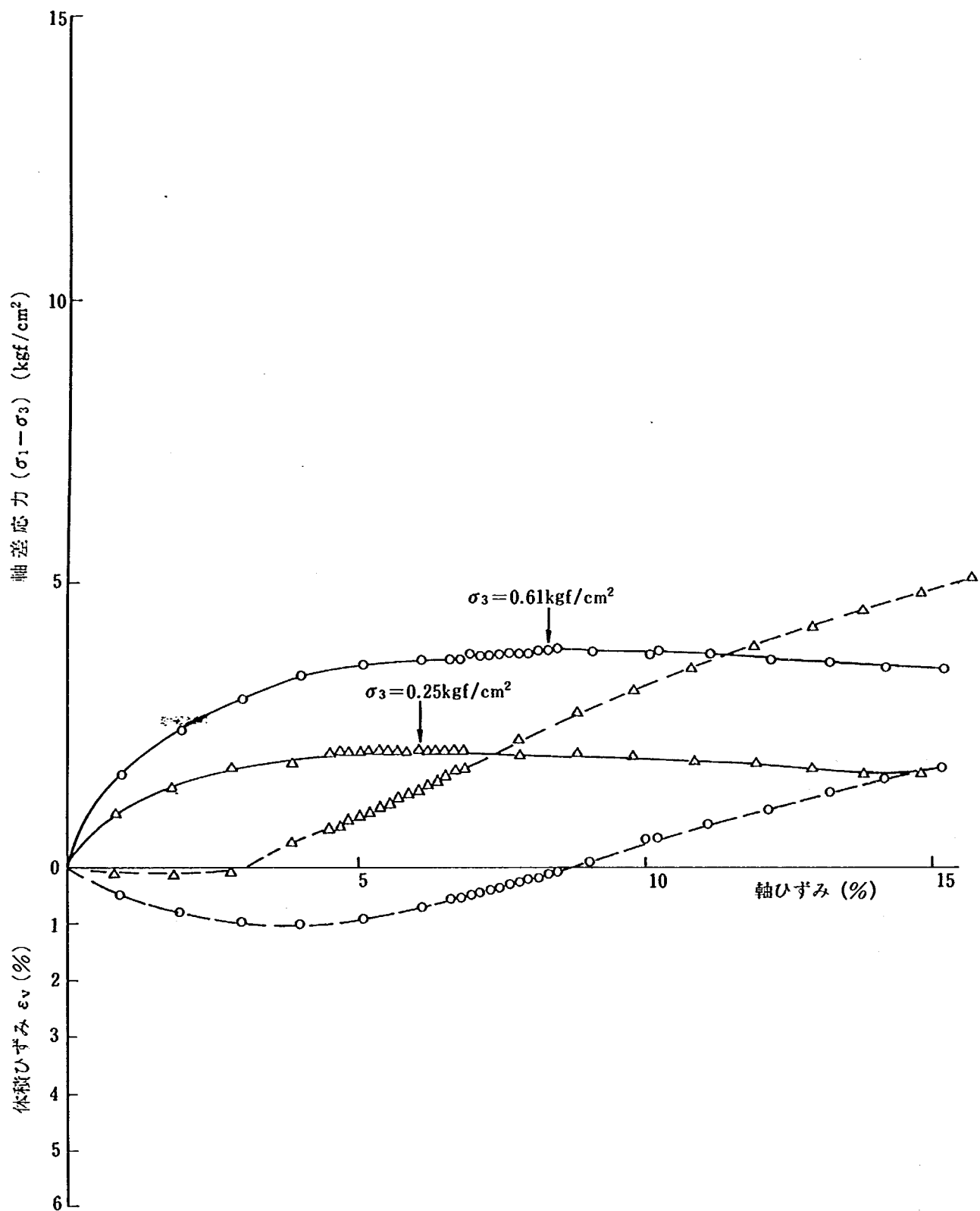


図 - 4. 23(3) 応力～ひずみ曲線 (輝綠凝灰岩, 長期載荷後・Dr=85%)

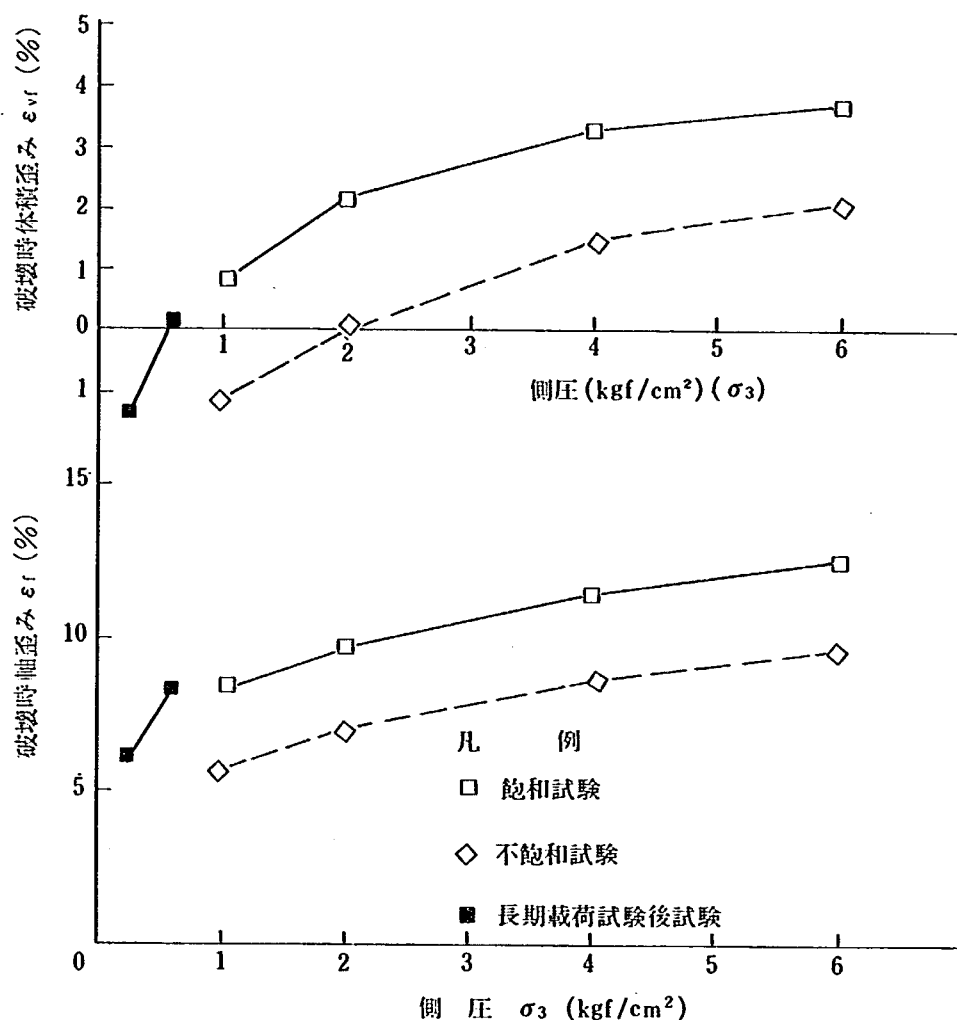


図-4.24 側圧と破壊時体積ひずみおよび軸ひずみの関係図(輝緑凝灰岩)

側圧と変形係数 E_{50} を図-4.25で見ると側圧に比例して大きくなる。不飽和試験の値が飽和試験よりも大きな値を示す。 E_r 図-4.26についても同様の傾向を示した。また長期载荷後供試体の変形性は、飽和状態試験より得られた変形性と同程度の範ちゅうにあるものと考えられる。

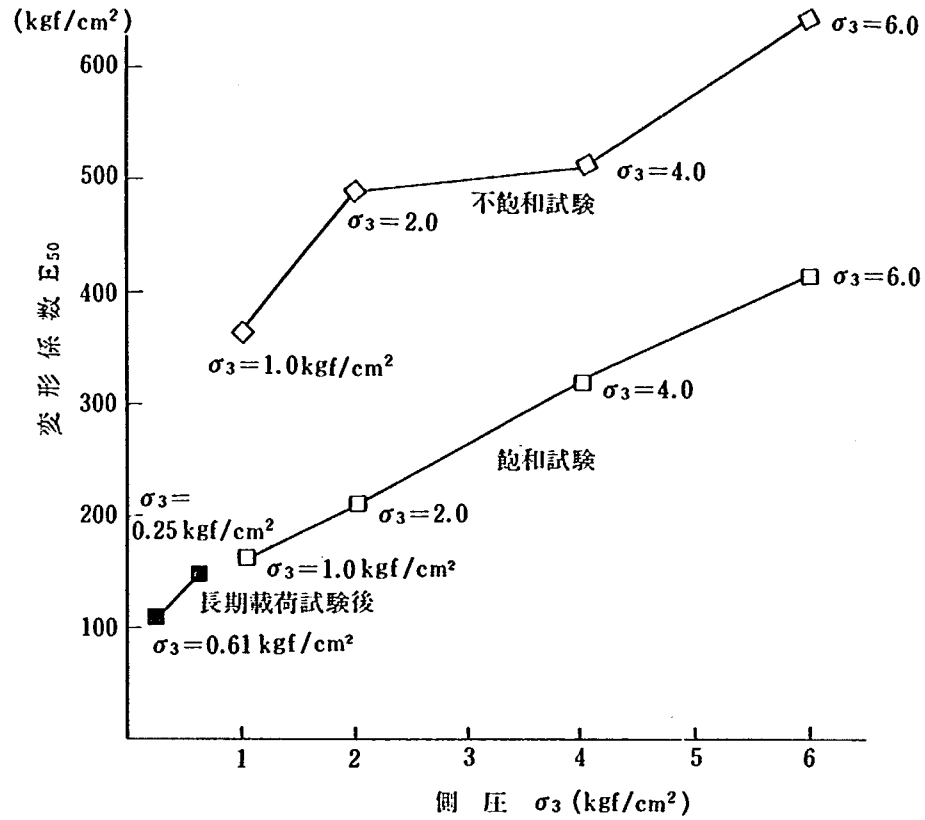


図 - 4. 25 側圧と変形係数 E_{50} の関係図 (輝緑凝灰岩)

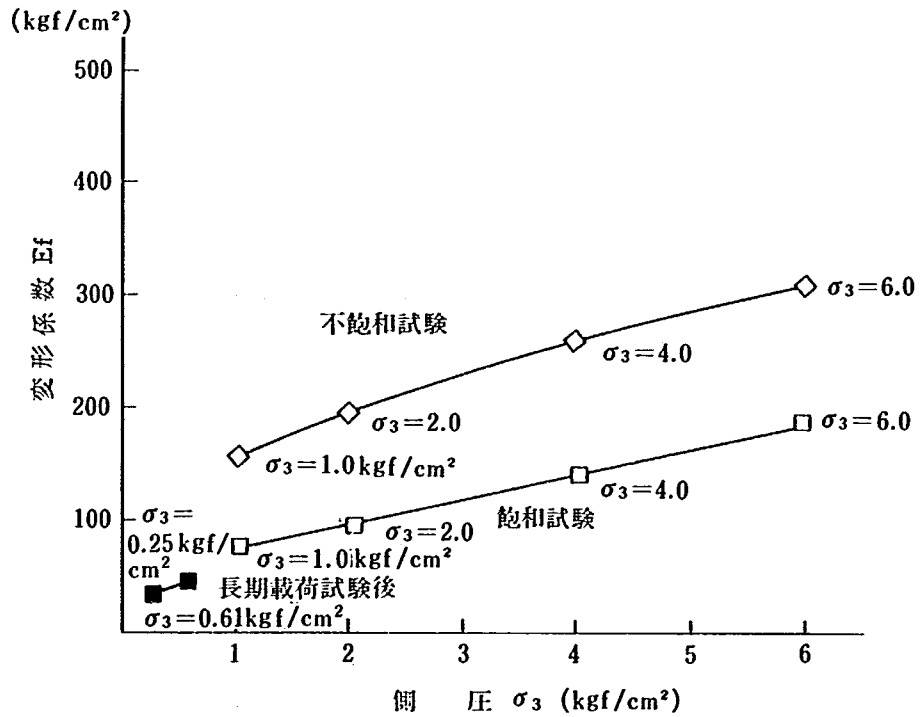


図 - 4. 26 側圧と変形係数 E_t の関係図 (輝緑凝灰岩)

3) 粒子破碎

三軸試験後の粒度分布と粒径別破碎率を図-4.27から図-4.29に示す。破碎率と主応力差の関係を図-4.30では、最大主応力差の増加に伴ない破碎率は多くなり、側圧の増加に比例している。飽和試験時破碎が不飽和試験時よりも多く現われる傾向になった。長期載荷後では側圧 0.25 kgf/cm^2 での破碎が多く現われているが、せん断強度低下に影響しているのかは疑問である。

4) 変水位透水試験

昭和59年度実施の輝緑凝灰岩について、三軸圧縮試験飽和時新鮮材料（搬入直後材料）と、長期載荷試験前と乾湿繰返し試験の18または19サイクル目と終了時に透水性を測定した。新鮮材料（搬入直後材料）と長期載荷試験時のサイクル数の増加による透水性の異なりを表-4.30・図-4.31, 4.32で見ることとした。

新鮮材料（搬入直後材料）の透水係数は、 $1.90 \cdot 3.84 \cdot 2.70 \cdot 1.84 \cdot 2.74 \cdot 4.00 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ であり、拘束応力 0.25 kgf/cm^2 では、1サイクルで $8.40 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、19サイクルで $8.03 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、30サイクルで、 $7.93 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ であり、給排水のサイクルの増加にもかかわらず、一定の状態であった。しかし、拘束応力が 0.61 kgf/cm^2 では1サイクル目が $2.10 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、18サイクル目で $1.24 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 、30サイクル目で、 $1.60 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ と透水係数が大きくなる結果が得られた。給排水の繰返しによって透水係数が大きくなった理由は明確ではないが、原因の1つとしては、長期載荷試験時供試体に給排水を繰返し与えたため、細粒な粒子が流出したことに伴って、透水係数が大きくなったことも考えられる。今後はこの点に着目して試験数量を増し調べる必要がある。

堤体ロックゾーン内部において、細粒分が増え透水係数が小さくなると（目安としては、 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 以下）、貯水位の急低下時には、ロックゾーン内部に残留間隙水圧が発生する可能性もある。残留間隙水圧が発生することに伴って堤体安定計算時の単位体積重量・せん断抵抗角等の値が変化して安全率が低下することもあると考えられる。

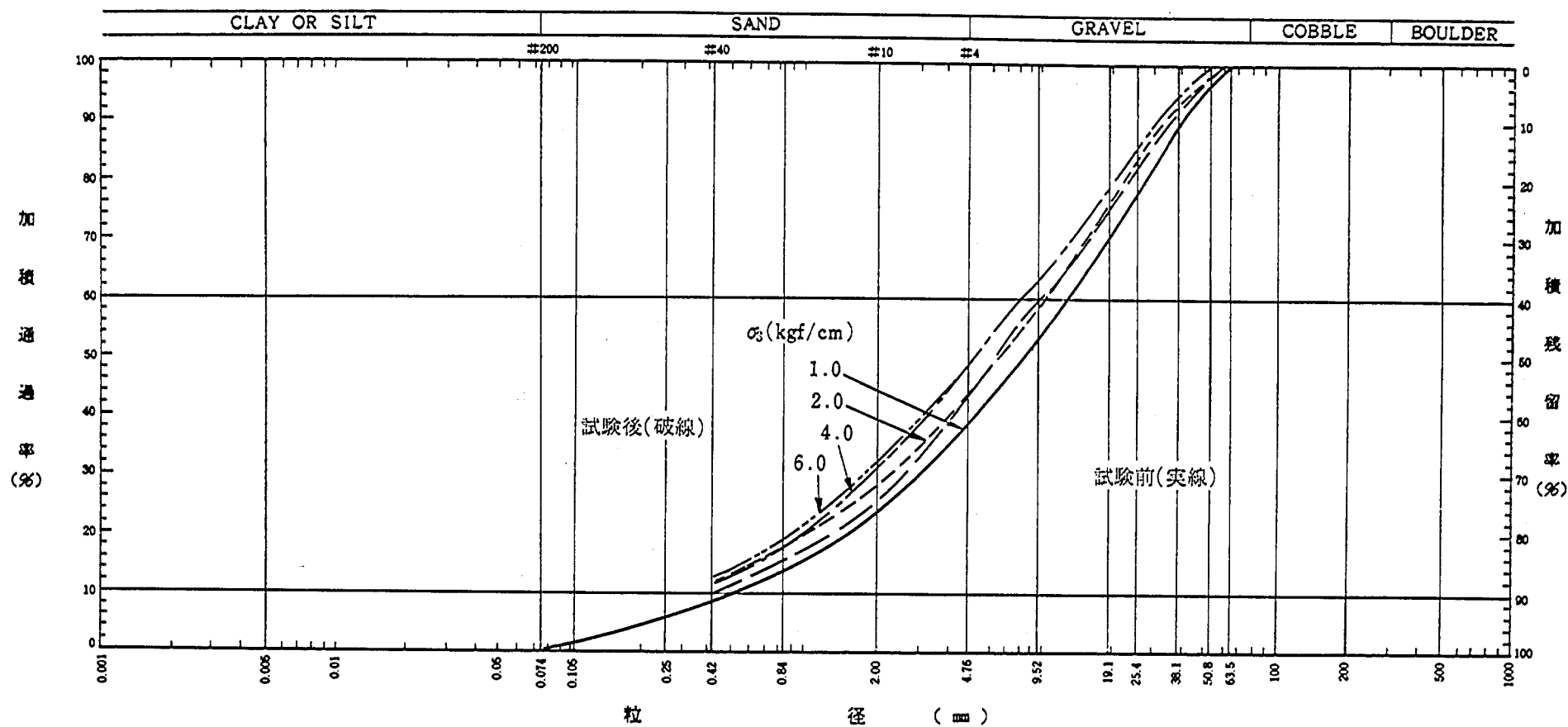


図 - 4. 27 (1) 三軸試験前後の加積通過曲線 (輝緑凝灰岩・不飽和状態)

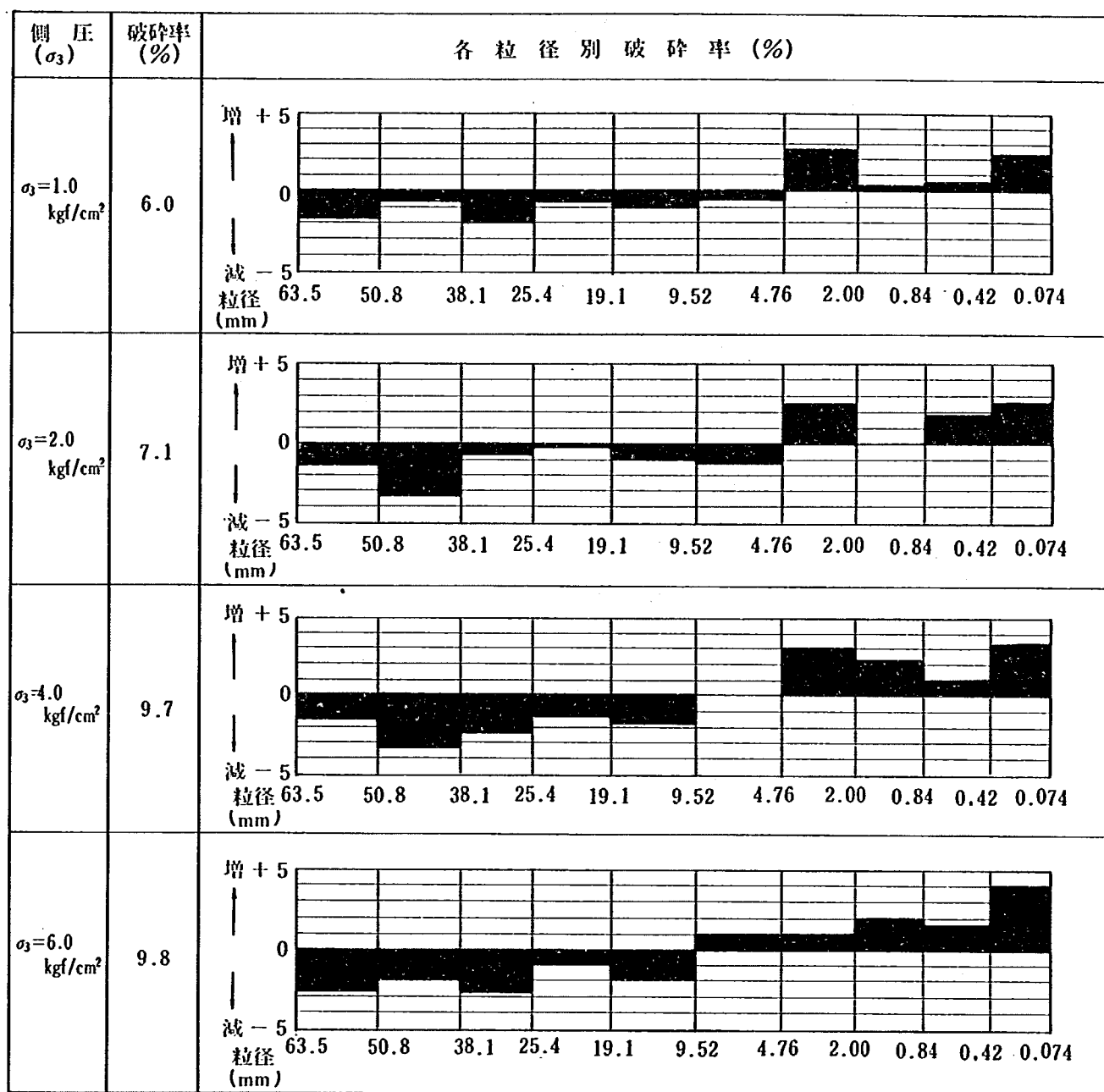


図 - 4.27 (2) 三軸後粒度試験 (輝綠凝灰岩・不飽和状態)

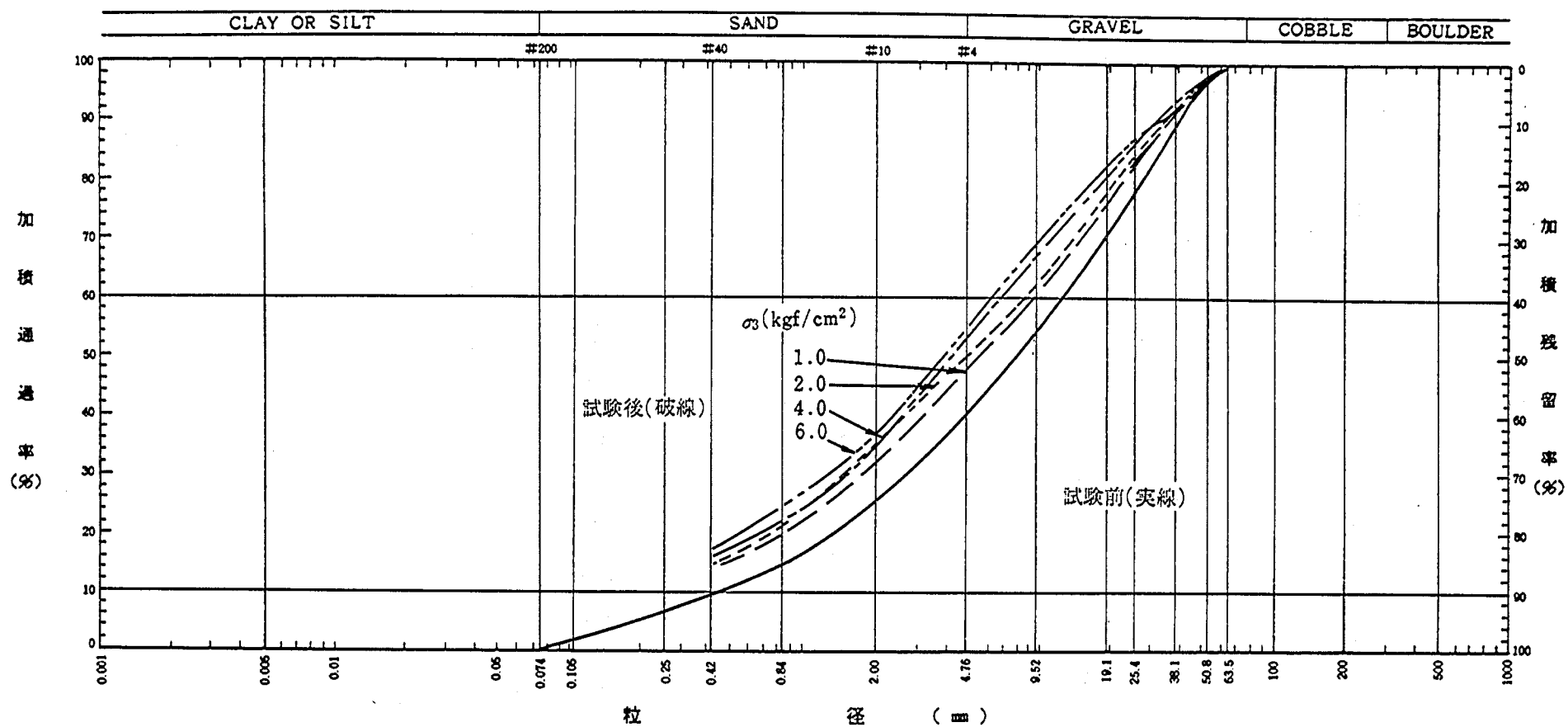


図 - 4. 28 (1) 三軸試験前後の加積通過曲線 (輝緑凝灰岩・飽和状態)

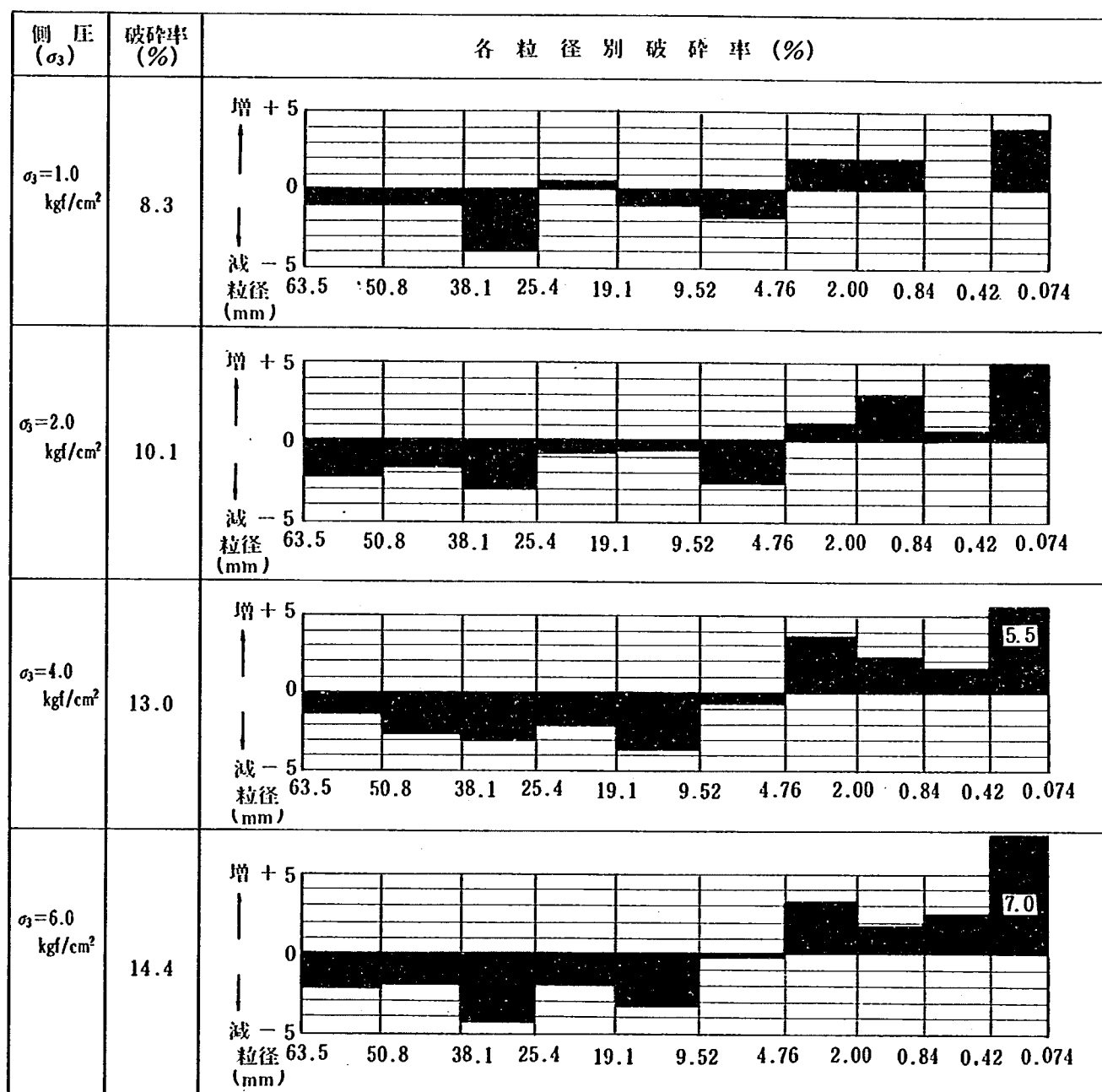


図 - 4. 28 (2) 三軸後粒度試験 (輝綠凝灰岩・飽和状態)

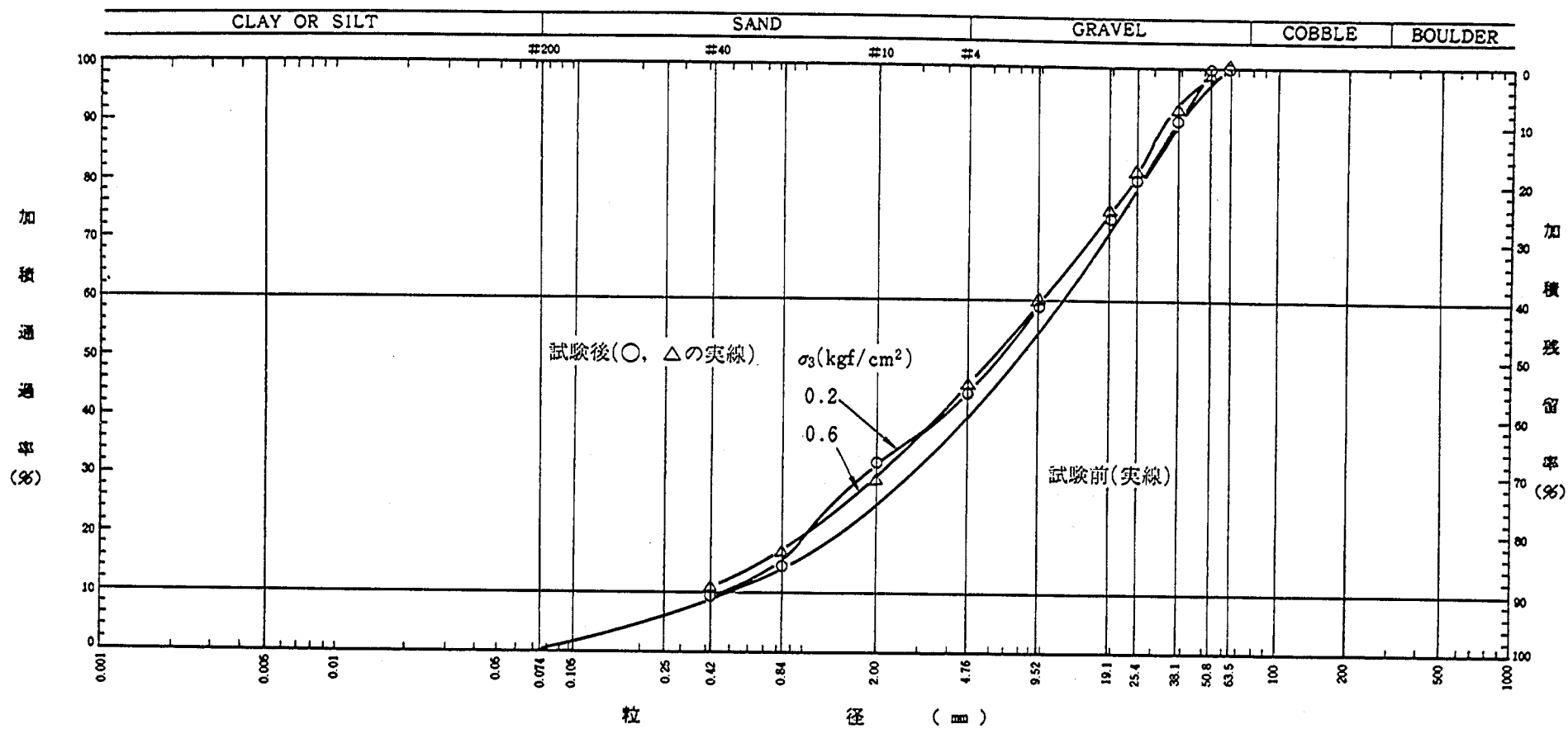


図 - 4. 29 (1) 三軸試験前後の加積通過曲線 (輝綠凝灰岩・長期載荷後)

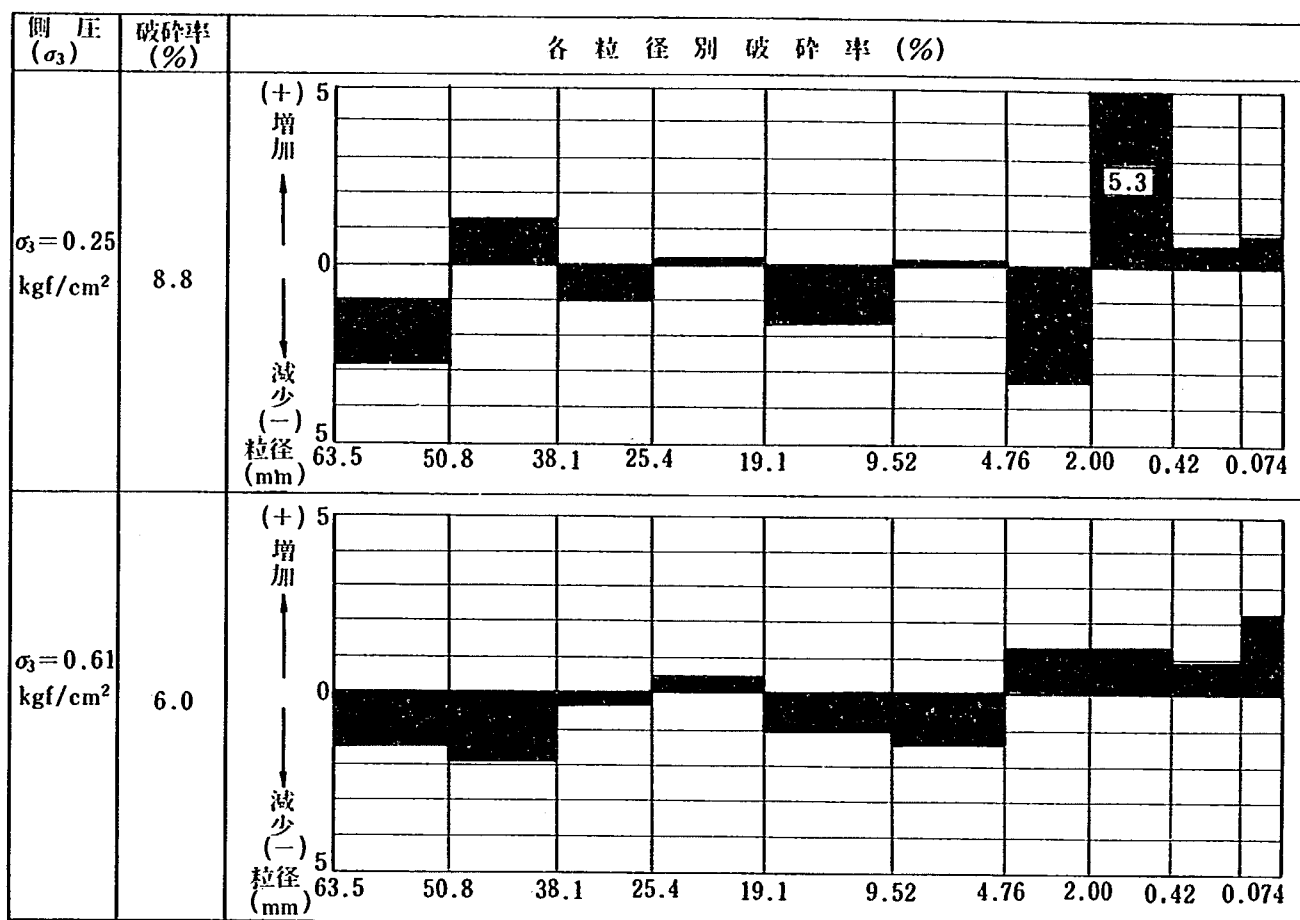


図 - 4. 29 (2) 三軸後粒度試験 (輝緑凝灰岩・長期載荷後)

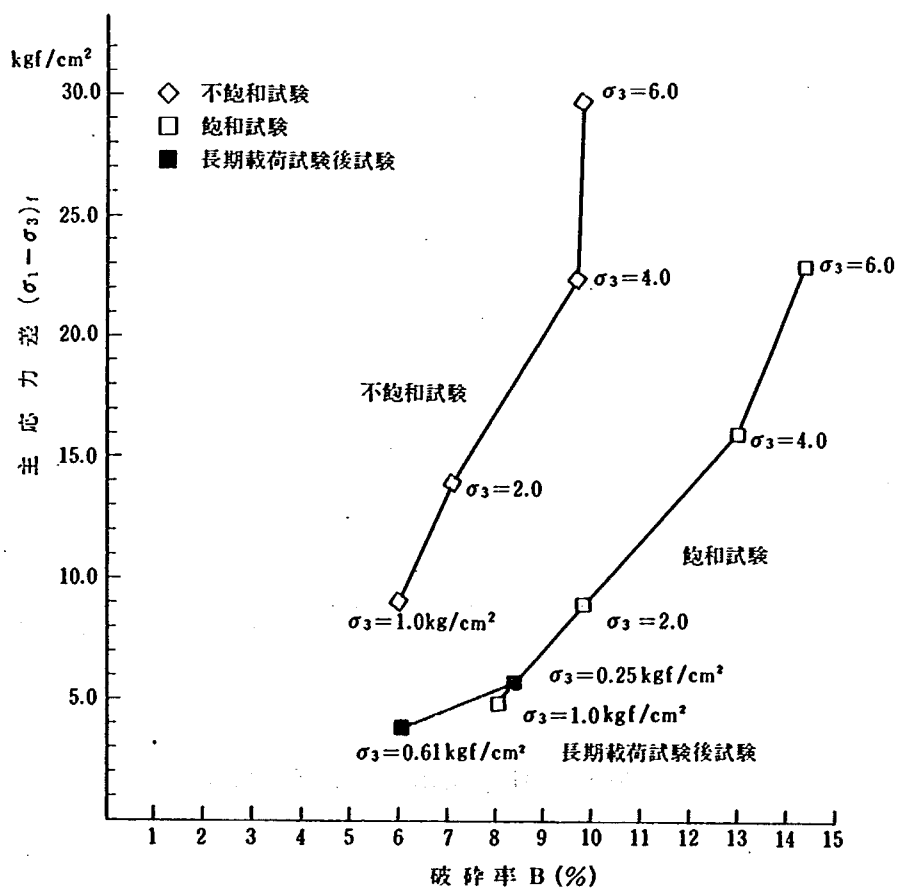


図 - 4. 30 破砕率と最大主応力差の関係図 (輝緑凝灰岩)

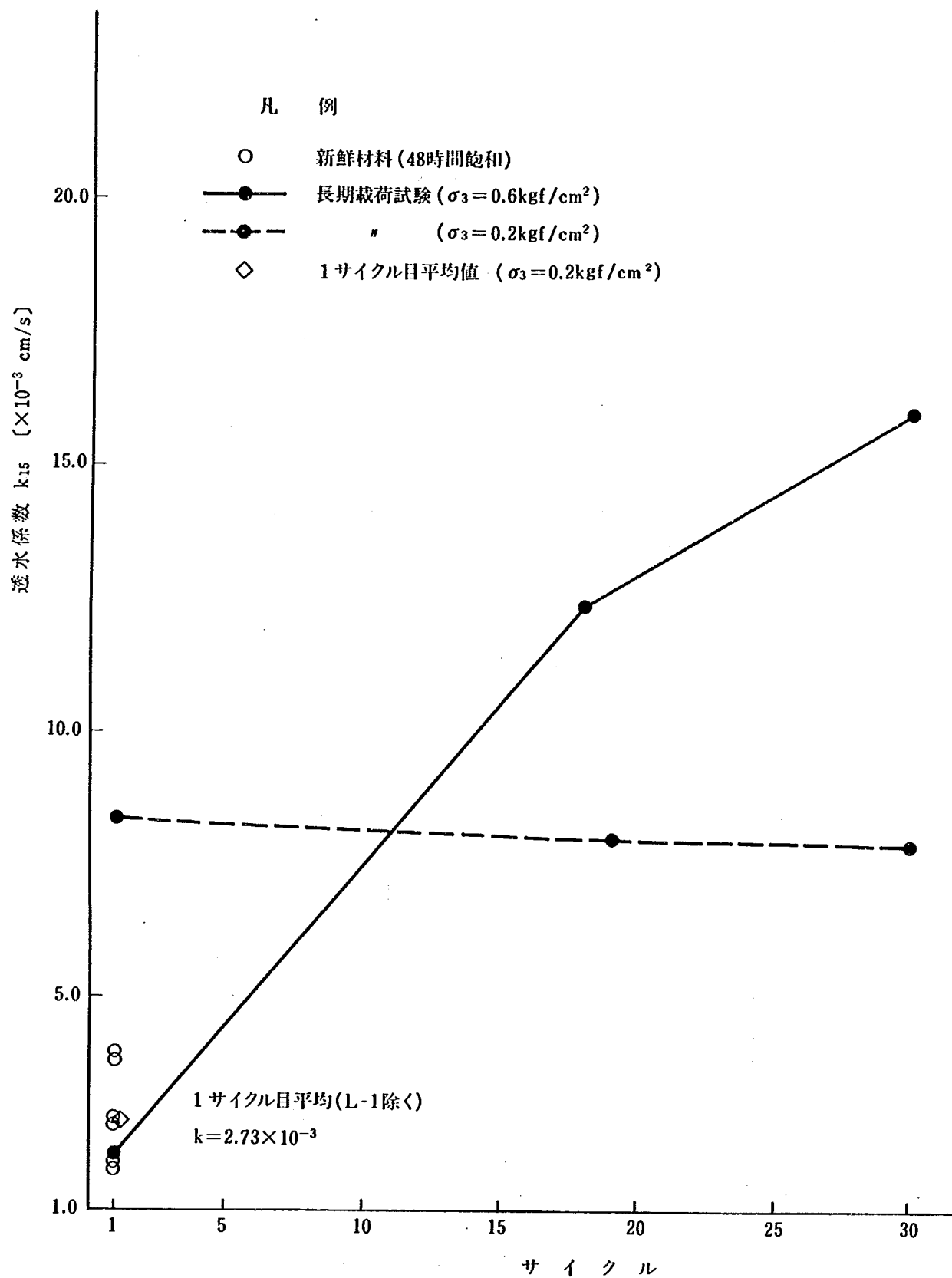


図 - 4. 31 変水位透水試験結果

表 - 4. 3 変水位透水試験結果一覧表

試 験 ケ - ス			透水係数 $k_{15}(\text{cm/s})$	間 隙 比 e	乾燥密度 $\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	飽 和 度 Sr (%)
※ 新 鮮 材 料	F - 1		1.90×10^{-3}	0.264	2.248	78.5
	F - 2		3.84×10^{-3}	"	2.249	76.7
	F - 3		2.70×10^{-3}	0.266	2.246	76.2
	F - 4		1.84×10^{-3}	0.264	2.249	87.3
	F - 5		2.74×10^{-3}	"	"	81.2
	F - 6		4.00×10^{-3}	"	"	98.5
長期 載 荷 試 験	$\sigma_3 = 0.6\text{kgf/cm}^2$	1 サイクル目	2.10×10^{-3}	0.262	2.253	-
		18 "	1.24×10^{-2}	0.216	2.338	-
		30 "	1.60×10^{-2}	0.215	2.340	-
	$\sigma_3 = 0.2\text{kgf/cm}^2$	1 "	8.40×10^{-3}	0.261	2.254	-
		19 "	8.03×10^{-3}	"	2.255	-
		30 "	7.93×10^{-3}	"	"	-

※ 搬入直後の材料

4.4 長期載荷試験および乾湿繰返し試験

長期載荷試験は、直径 30 × 高さ 60 cm の供試体に飽和状態と排水状態をそれぞれ 48 時間与え、それを 1 サイクルとし 30 サイクル実施し供試体の沈下量を測定した。また、粒子 1 個に湿潤状態・排水状態をそれぞれ 48 時間与え、それを 1 サイクルとし 30 サイクル実施し重量損失を測定する乾湿繰返し試験を実施した。

4.4.1 長期載荷試験

長期載荷試験の結果を図 - 4.33 に示す。風化の影響が予想される輝緑凝灰岩について、拘束応力 $0.2 \cdot 0.6 \text{ kgf/cm}^2$ の 2 試験を実施した。拘束応力 0.2 kgf/cm^2 での間隙比の変化を見ると初期間隙比 0.261 が 30 サイクルまで、殆んど変化しておらず、沈下量で見ると初期状態（実験に入る準備段階）で変化が大きく拘束応力を加える為給水した状態で 0.131 mm、供試体内に給水開始後数分で 0.550 mm まで沈下し、それ以後のサイクルでは若干の変動はあるが一定値を示した。拘束応力 0.6 kgf/cm^2 での間隙比の変動を見ると間隙比 0.262 から 1 サイクル目の飽和状態の 0.225 までは急勾配の変化率で低下し、さらに 4 サイクル終了時の 0.219 までは間隙比の減少が顕著であるが、それ以後 30 サイクルまでは 0.215 ~ 0.219 の間ではほぼ一定値である。沈下量では、側圧の影響（試験途中の停電に伴うもの）で 2 サイクル目の飽和状態で 0.821 mm・排水状態で 2.175 mm と極端に低下し、それ以後 30 サイクル終了時の 2.271 mm まではほぼ一定勾配で沈下を示した。なお、25 サイクルから 27 サイクルまでに 2.237・2.185・2.107・2.122・2.238・2.276 mm と値が変動しているが 28 サイクルより 30 サイクルまでで元の状態に戻っている。以上のことより、本ロック材は初期給水時の供試体高の沈下が大きく、それ以後は本試験での載荷応力範囲では、拘束圧力には関係なく大きな変化を示さない。

4.4.2 乾湿繰返し試験

乾湿繰返し試験は乾燥・湿潤状態を各々 48 時間で 1 サイクルとして 30 サイクル実施した。乾湿繰返し試験結果は以下に示す岩石粒子の重量損失率に着目した方法で整理した。試験結果を試験条件別に粒径毎の平均で示したものが図 - 4.34 である。乾湿繰返し試験結果（粒径別）で見ると、粒径別には顕著な差は見られず試験状態の違いが大きく影響していることを示している。また、乾湿繰返し試験結果（試験条件別）、図 - 4.35 を見ると、拘束・自然乾燥では初期状態から変化は見られず、室内・自然乾燥と拘束・自然乾燥では初期 ~ 30 サイクルまで若干増加する（室内・自然乾燥の方が少な目）傾向を示している。また 30 サイクル後の結果によると、室内・強制乾燥で 1.7 %、拘束・自然乾燥で 0.1 %、室内・自然乾燥で 0.5 %、拘束・強制乾燥で 0.65 % の重量損失率であり、自然乾燥よりも強制乾燥の方が大きい。しかし、損失率の値は平均値の最大でも 1.7 % と小さな値である。

A : 1 サイクル目の各々の条件下の 48hr 乾燥後の重量

B : 各々のサイクルの条件下の 48hr 乾燥後の重量

$$\text{岩石粒子の重量損失率の定義} = \frac{B - A}{A} \times 100 (\%)$$

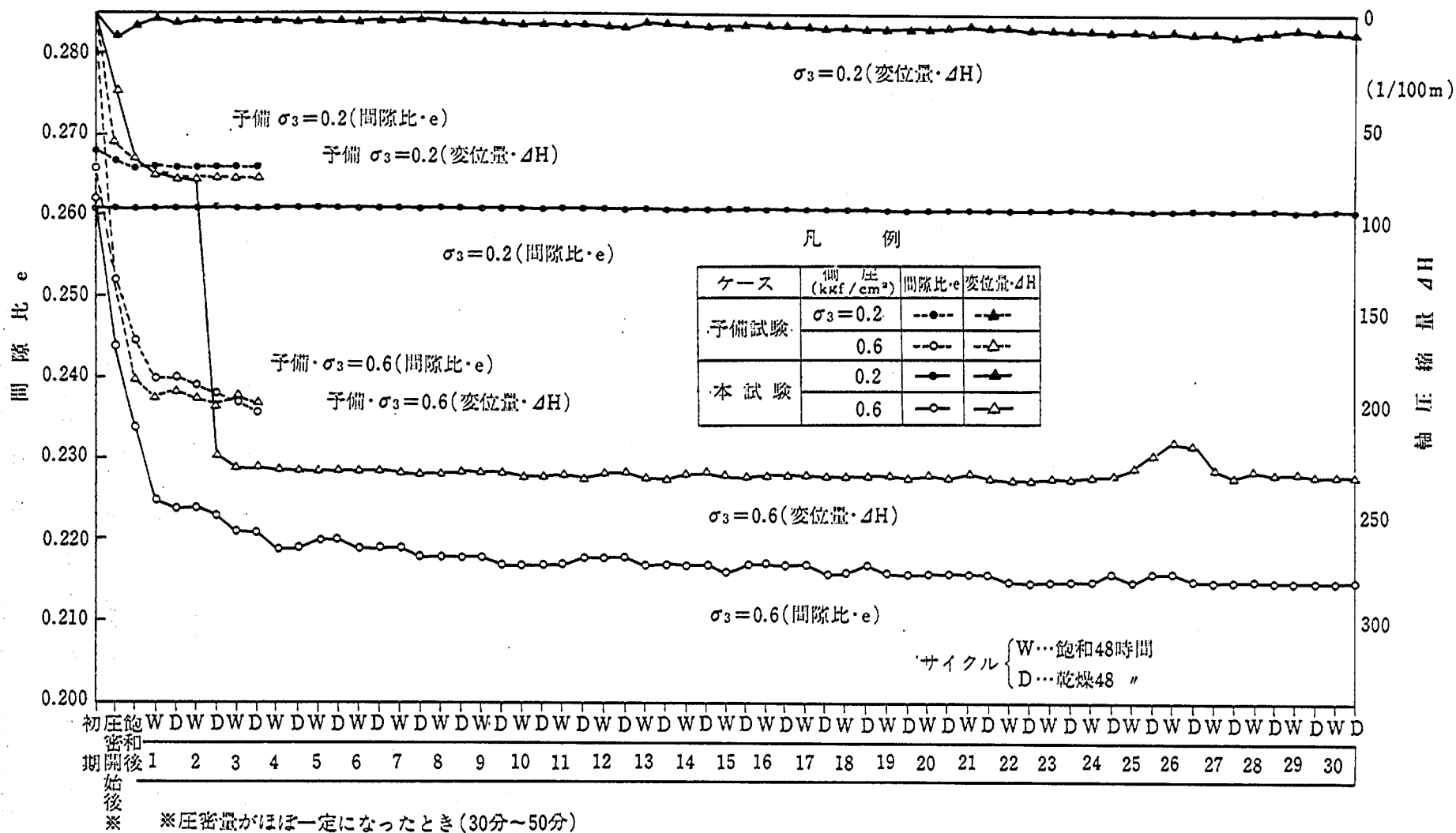


図 - 4. 33 長期載荷試験結果 e , $\Delta H \sim$ サイクル

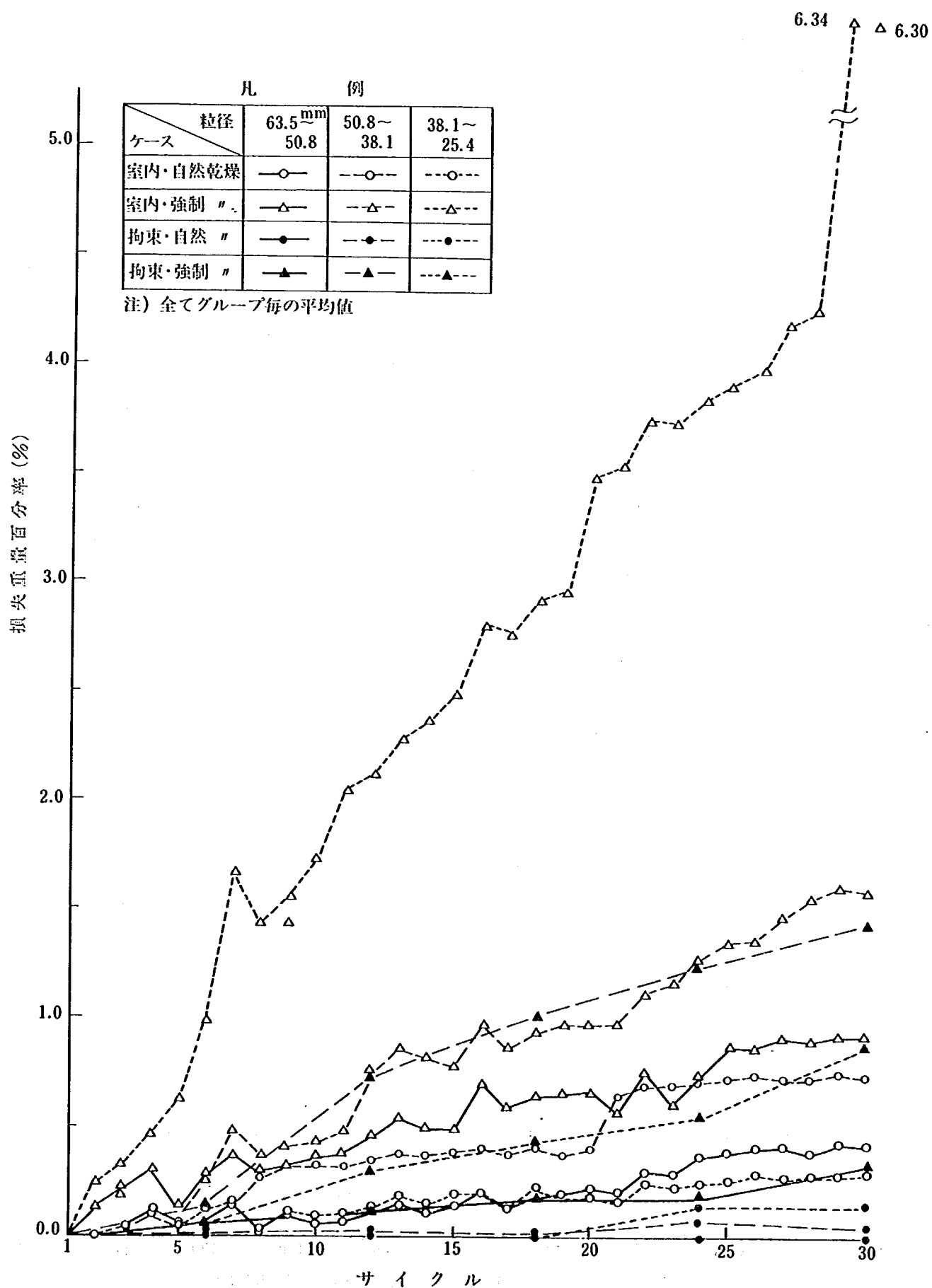


図 - 4. 34 乾湿繰返し試験結果 (粒径別損失重量百分率)

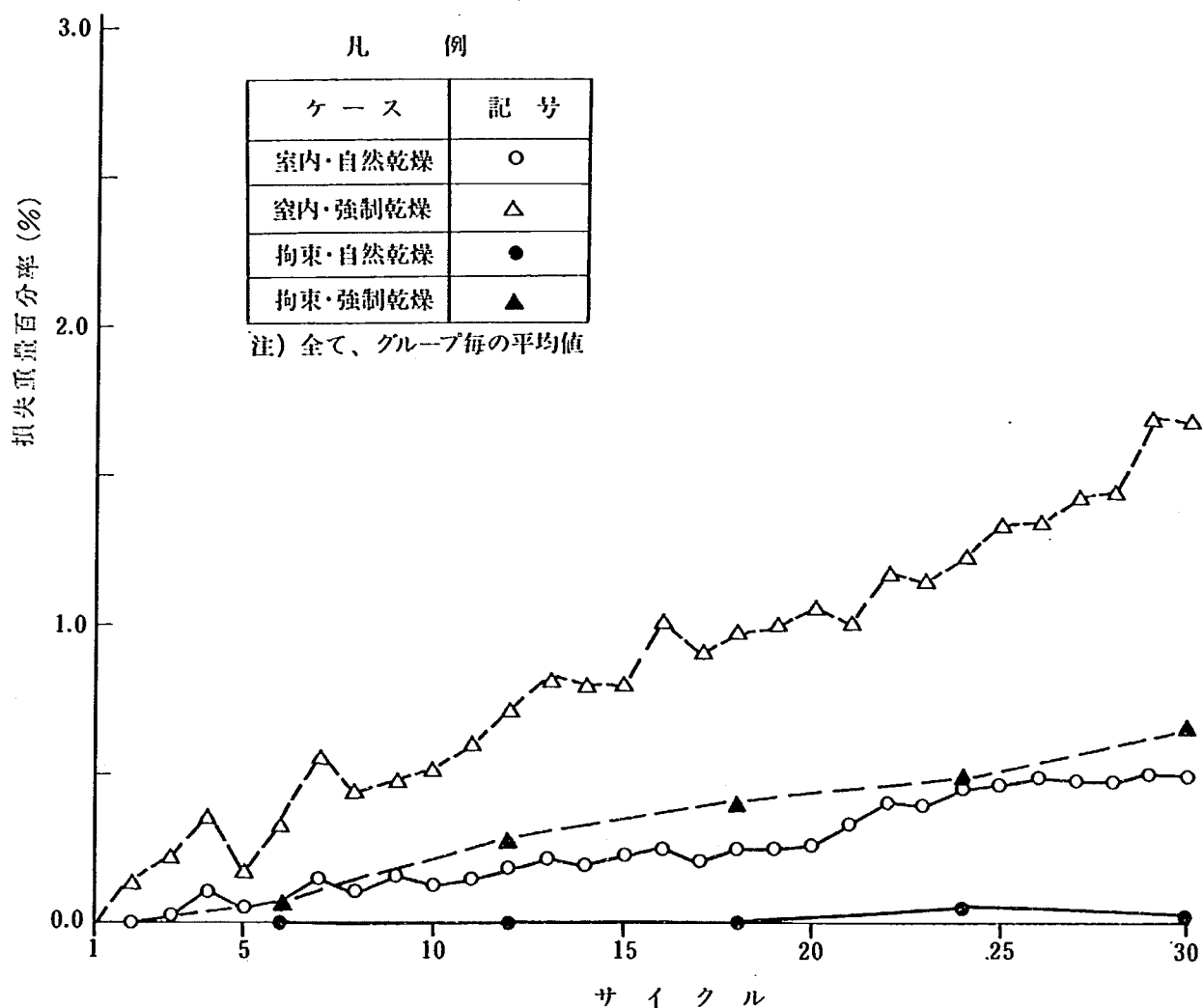


図 - 4. 35 乾湿繰返し試験結果 (ケース別損失重量百分率)

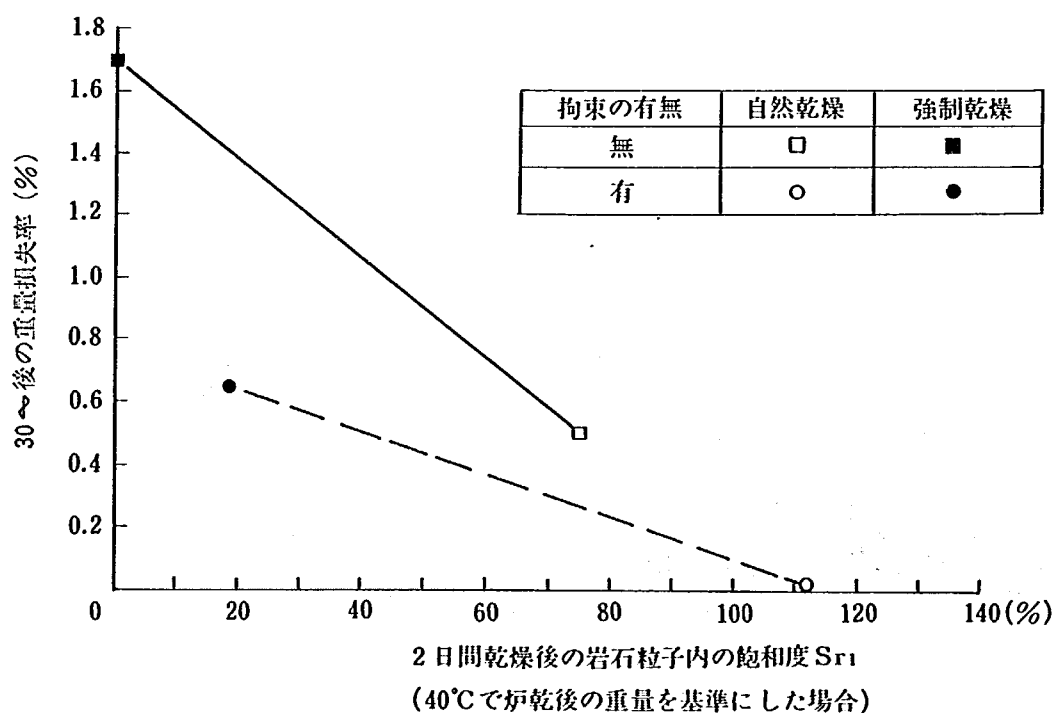


図 - 4. 36 岩石粒子内の飽和度変化 ($Sr = 100 \sim Sr_1$) と重量損失

以上をまとめると下記の通りである。

① 自然乾燥状態で拘束応力の有無が重量損失に与える影響

30 サイクル終了時の重量損失率で比較すると、拘束しない場合の 0.5 % に対して、拘束した場合には 0.1 % と拘束した方が重量損失率がやや小さい。

② 強制乾燥 (40 °C) 状態で拘束応力の有無が重量損失に与える影響

30 サイクル終了時の重量損失率で比較すると拘束しない場合の 1.7 % に対して拘束した場合には 0.7 % と拘束した方が重量損失が半分以下である。

本試験の結果では、拘束応力の有無が岩石粒子の重量損失変化に関与していることが認められた。しかし、基本的には、岩石内の含水状態変化を与えたわけであるから本試験方法・条件での含水量変化を把握しておくことが必要である。以下に各々の状態での岩石粒子内の飽和度変化を調べた結果を表 - 4.4 (1)(2) に示す。調査試験に当っては、粒径 40 ~ 60 mm 程度のものを各試験条件別に 5 個サンプリングして行った。

飽和度については、表中に示す算出式によって、乾燥温度状態を 40 °C ・ 60 °C ・ 110 °C の各々基準にして求めている。40 °C 乾燥重量を基準にした飽和度の平均変動幅は下記に示す通りである。

1) 拘束をした状態

① 自然乾燥の場合 平均値で $S_r = 100 \sim 112\%$

② 強制乾燥の場合 平均値で $S_r = 19 \sim 100\%$

2) 拘束をしない状態

① 自然乾燥の場合 平均値で $S_r = 75 \sim 100\%$

② 強制乾燥の場合 平均値で $S_r = 0 \sim 100\%$

図 - 4.36 に 40 °C 炉乾燥後 (2 日間) の重量を基準にした各々の試験条件乾燥後の飽和度と、30 サイクル試験後の平均重量損失率の関係を示す。試験結果より重量損失率は、 S_r の変動幅の大きい方が小さなものより大きく現われる傾向を示している。また、拘束の有無による影響も認められ、拘束の有る方が無い状態よりも損失率が小さくなる傾向が現われている。以上の結果より、岩石粒子 (輝緑凝灰岩) の長期安定性に着目し、一層の安全を考慮するならば拘束応力があり、粒子の飽和度の変化の少ない内部ロックとして使用すべきである。

表 - 4. 4 (1) 乾湿繰返し試験時の粒子飽和度変化調査 (羽地) 拘束: ⑤・無

条 件 測 定			自 然 乾 燥					強 制 乾 燥				
			Na 1	Na 2	Na 3	Na 4	Na 5	Na 1	Na 2	Na 3	Na 4	Na 5
① 水中 2 日後の 表乾重量			298.47 ^{gf}	325.55 ^{gf}	267.21 ^{gf}	274.95 ^{gf}	353.70 ^{gf}	314.44 ^{gf}	257.86 ^{gf}	198.42 ^{gf}	229.63 ^{gf}	199.07 ^{gf}
② 40℃ 2 日間 炉乾後の重量			296.13	322.14	265.78	273.07	351.37	312.60	256.21	196.78	227.75	197.02
⑦ 試 験	③ 40℃ 2 日間 炉乾後重量							313.01	256.52	197.08	228.13	197.29
	④ 室内 2 日間 自然乾燥後重量		298.71	325.64	267.48	275.21	354.01					
⑤ 2 日間 60℃ 炉乾後の重量			295.40	321.25	265.36	272.45	350.57	312.15	255.89	196.43	227.33	196.66
⑥ 2 日間 110℃ 炉乾後の重量			294.62	320.50	264.93	271.75	349.60	311.56	255.52	196.07	226.78	196.33
Sr の 値 (%)	40℃ 基 準	⑦-② ①-②	110.3 [%]	102.6 [%]	118.9 [%]	113.8 [%]	113.3 [%]	22.3 [%]	18.8 [%]	18.3 [%]	20.2 [%]	13.2 [%]
	60℃ 基 準	⑦-⑤ ①-⑤	107.8	102.1	114.6	110.4	109.9	37.6	32.0	32.7	34.8	26.1
	110℃ 基 準	⑦-⑥ ①-⑥	106.2	101.8	111.8	108.1	107.6	50.3	42.7	43.0	47.4	35.0
$Q = \frac{①-⑥}{⑥} \times 100$ (%)			1.3	1.6	0.9	1.2	1.2	0.9	0.9	1.2	1.3	1.4

表 - 4. 4 (2) 乾湿繰返し試験時の粒子飽和度変化調査 (羽地) 拘束: 有・⑤

条 件 測 定			自 然 乾 燥					強 制 乾 燥				
			Na 1	Na 2	Na 3	Na 4	Na 5	Na 1	Na 2	Na 3	Na 4	Na 5
① 水中 2 日後の 表乾重量			522.92 ^{gf}	176.54 ^{gf}	471.54 ^{gf}	244.94 ^{gf}	317.94 ^{gf}	211.29 ^{gf}	495.97 ^{gf}	393.48 ^{gf}	325.60 ^{gf}	238.61 ^{gf}
② 40℃ 2 日間 炉乾後の重量			519.76	175.37	467.00	243.69	316.60	207.49	490.29	391.61	323.66	235.77
⑦ 試 験	③ 40℃ 2 日間 炉乾後重量							207.49	490.29	391.61	323.66	235.77
	④ 室内 2 日間 自然乾燥後重量		522.19	176.33	470.03	244.61	317.63					
⑤ 2 日間 60℃ 炉乾後の重量			518.68	175.01	465.61	243.40	316.22	206.54	489.42	390.90	322.70	234.65
⑥ 2 日間 110℃ 炉乾後の重量			517.32	174.66	464.06	243.16	315.80	206.06	488.81	390.42	321.90	233.86
Sr の 値 (%)	40℃ 基 準	⑦-② ①-②	76.9 [%]	82.1 [%]	66.7 [%]	73.6 [%]	76.9 [%]	0.0 [%]	0.0 [%]	0.0 [%]	0.0 [%]	0.0 [%]
	60℃ 基 準	⑦-⑤ ①-⑤	82.8	86.3	74.5	78.6	82.0	20.0	13.3	27.5	33.1	28.3
	110℃ 基 準	⑦-⑥ ①-⑥	87.0	88.8	79.8	81.5	85.5	27.3	20.7	38.9	47.6	40.2
$Q = \frac{①-⑥}{⑥} \times 100$ (%)			1.1	1.1	1.6	0.7	0.7	2.5	1.5	0.8	1.1	2.0

4.5 粒子形状・点载荷圧裂試験およびX線分析

砂岩では粒子形状と点载荷圧裂試験を新鮮材料（搬入直後の材料）で実施し、輝緑凝灰岩では粒子形状、点载荷圧裂試験・X線分析を新鮮材料（搬入直後の材料）と長期载荷試験後で実施し比較した。

表 - 4.5 粒子形状調査結果（頻度）

Zingg の分類による。

試験 形状	砂 石		輝緑凝灰岩	室内・自然乾燥		室内・強制乾燥		拘束・自然乾燥		拘束・強制乾燥	
	砂岩 I	砂岩 II		試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後
板 状	※150 51 (34%)	※210 73 (35%)	※158 64 (41%)	20	17	20	19	3	3	4	4
塊 状	54 (36)	36 (17)	20 (13)	7	5	7	6	0	0	0	0
葉 状	32 (21)	56 (27)	48 (30)	11	13	12	11	3	3	3	2
棒 状	13 (9)	45 (21)	26 (16)	7	9	6	9	1	1	1	2
判 定	板・塊状	板状	板・葉状	板・葉状	板・葉状	板・葉状	板・葉状	板・葉状	板・葉状	板・葉状	板・葉状

※ 全体の個数

粒子形状の調査結果を図 - 4.37 ~ 4.39 と、表 - 4.5.で見ると砂岩 I では板・塊状で、砂岩 II では板状、輝緑凝灰岩では板・葉状であり、乾湿繰返し試験では粒子形状に与える影響は殆んどなかった。

表 - 4.6 岩石の点载荷圧裂強度調査結果

試験項目		粒 径	63.5 ~50.8mm	50.8 ~ 38.1mm	38.1 ~25.4 mm	25.4 ~19.1mm	19.1 ~9.52mm	平均 kgf/cm ²
砂 岩	砂 岩 I		kgf/cm ² 60.90	kgf/cm ² 58.66	kgf/cm ² 93.80	kgf/cm ² 107.59	kgf/cm ² 184.81	※(101.15)kgf/cm ² 71.12
	砂 岩 II		151.01	249.78	177.94	< 20> 253.36	< 20> 221.84	※(210.79) 192.91
輝 緑 凝 灰 岩	新 鮮 材 (搬入直後の材料)		80.32	39.04	92.50	155.91	145.66	※(102.69) 70.62
	飽 和 48 時 間 後		37.76	56.52	72.81	< > 内はサンプリング個数 ・無印は 10 個 左試験は 15 個ずつサンプリングしたが測定できたものが < > 内である。		55.70
	乾 湿 繰 返 し 後	室内・自然乾燥	38.06	<11> 65.02	<11> 82.81			61.96
		室内・強制乾燥	<9> 34.70	<13> 54.07	<11> 132.54			73.77
		拘束・自然乾燥	<2> 73.60	< 2> 54.30	< 1> 62.70	左試験は 7 個ずつサンプリングしたが測定できたものが < > 内である。		63.53
		拘束・強制乾燥	<3> 17.50	< 1> 37.40	< 1> 124.5			59.80

※()内は代表値を求めたもの
代表値は 5 粒径の平均

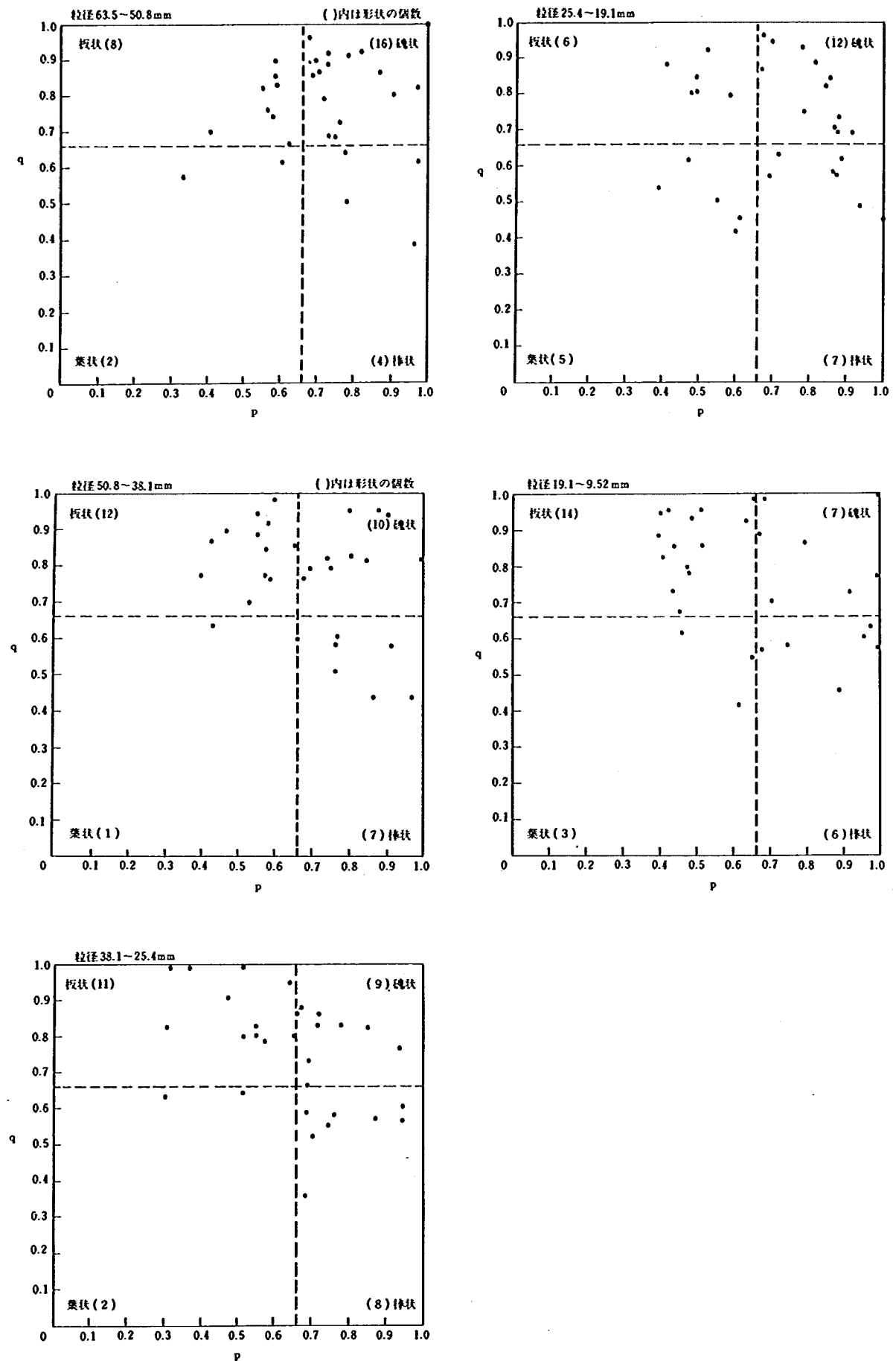


図 - 4. 37 粒子形状図 (砂岩 I)

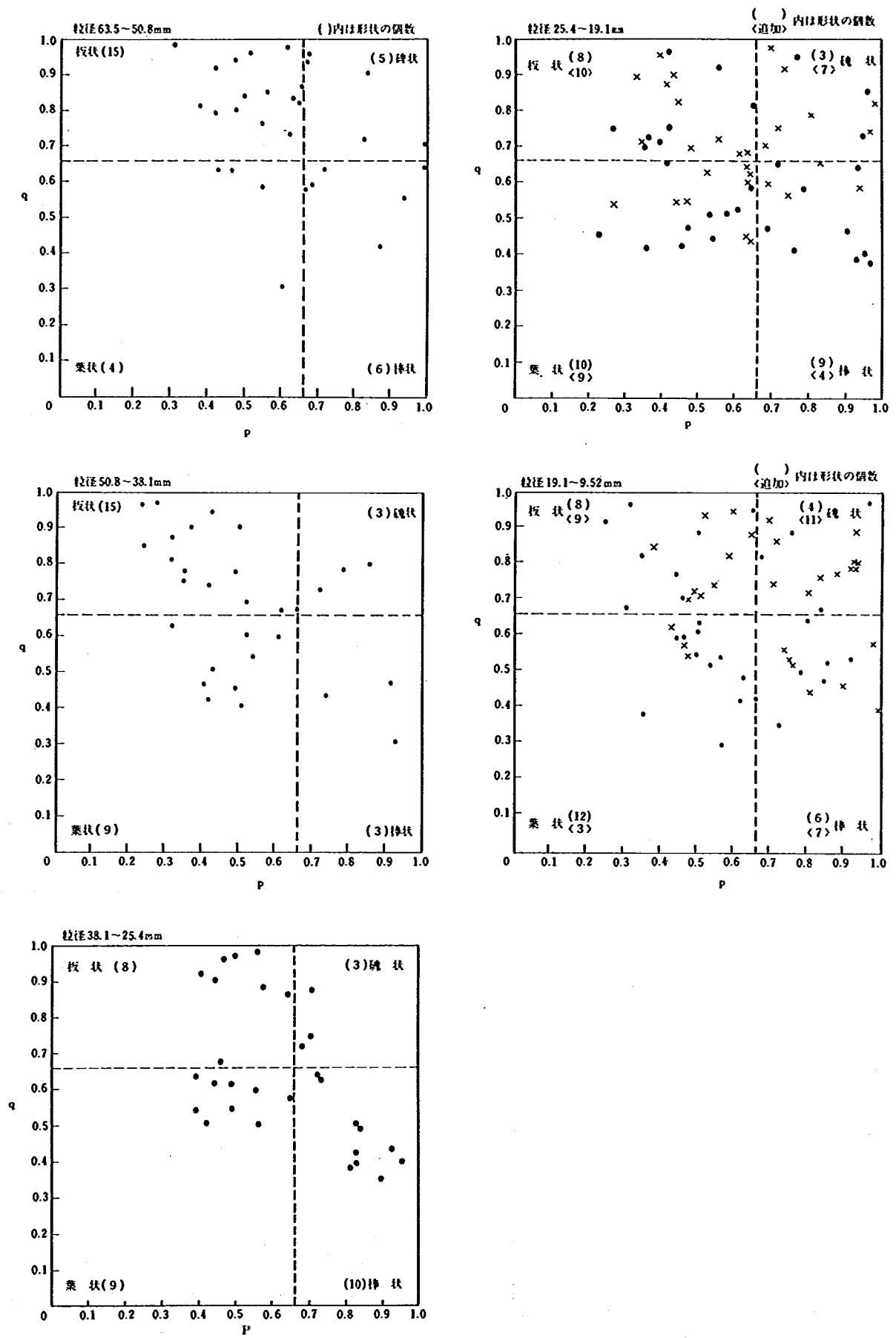


図 - 4.38 粒子形状図 (砂岩 II)

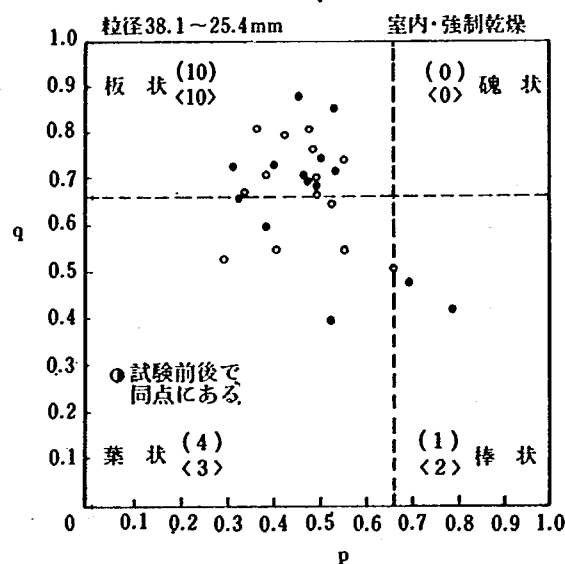
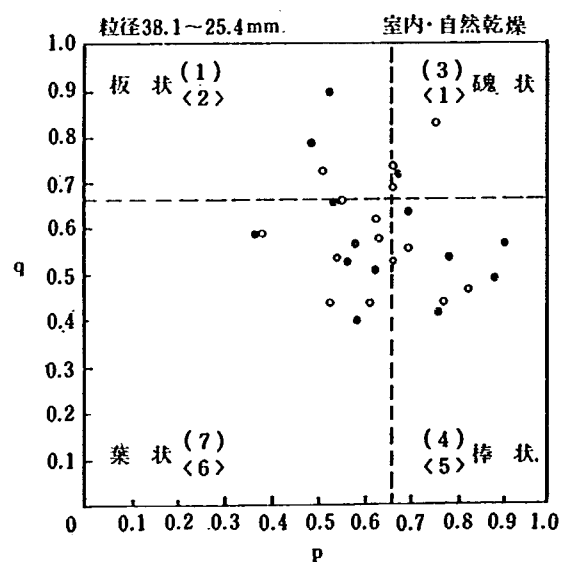
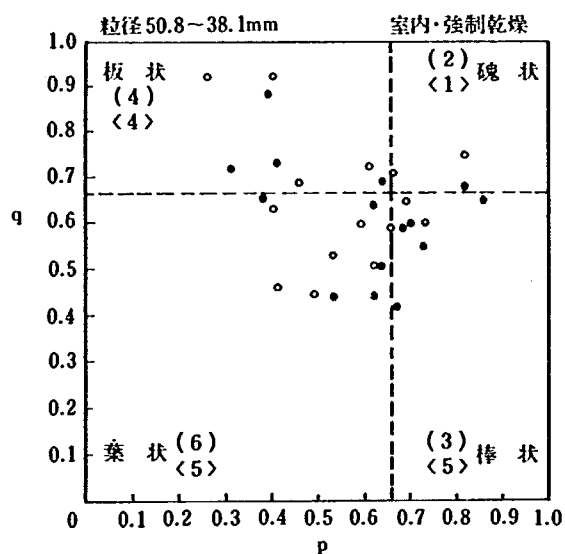
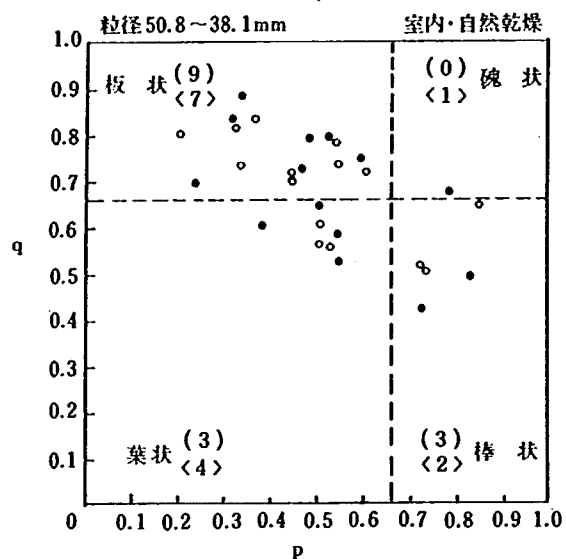
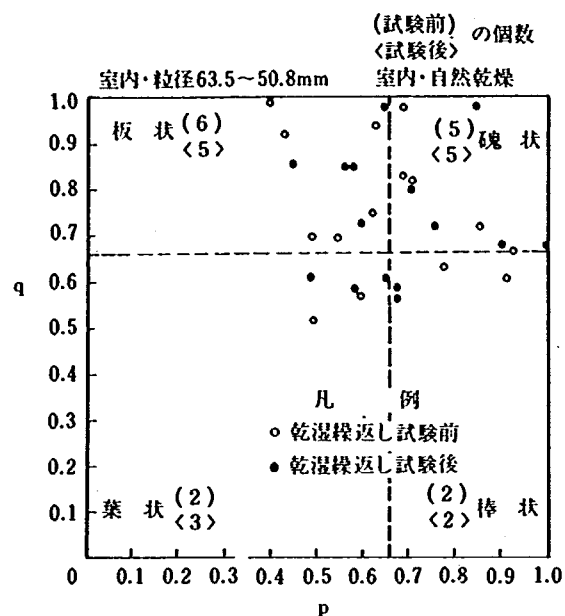
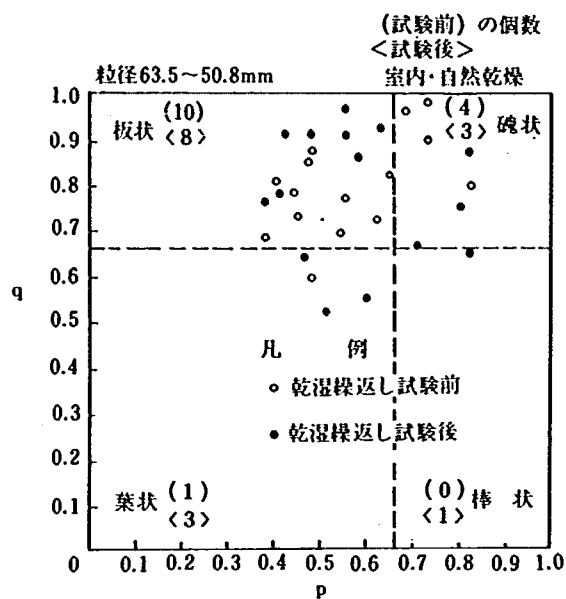


図 - 4. 39 (1) 粒子形状図 (輝緑凝灰岩・室内・自然乾燥前後)

図 - 4. 39 (2) 粒子形状図 (輝緑凝灰岩・室内・強制乾燥前後)

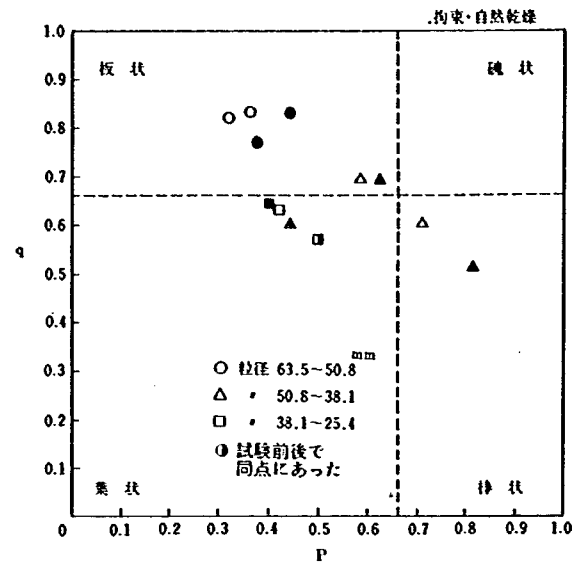
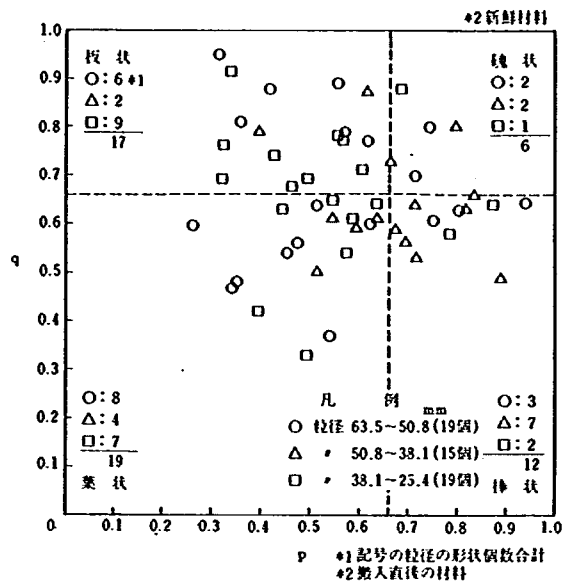


図 - 4. 39 (3) 粒子形状図 (輝緑凝灰岩・点載荷前・新鮮材)

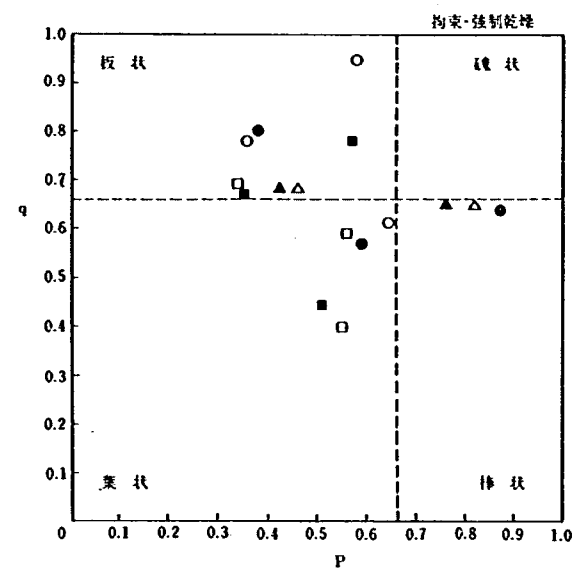
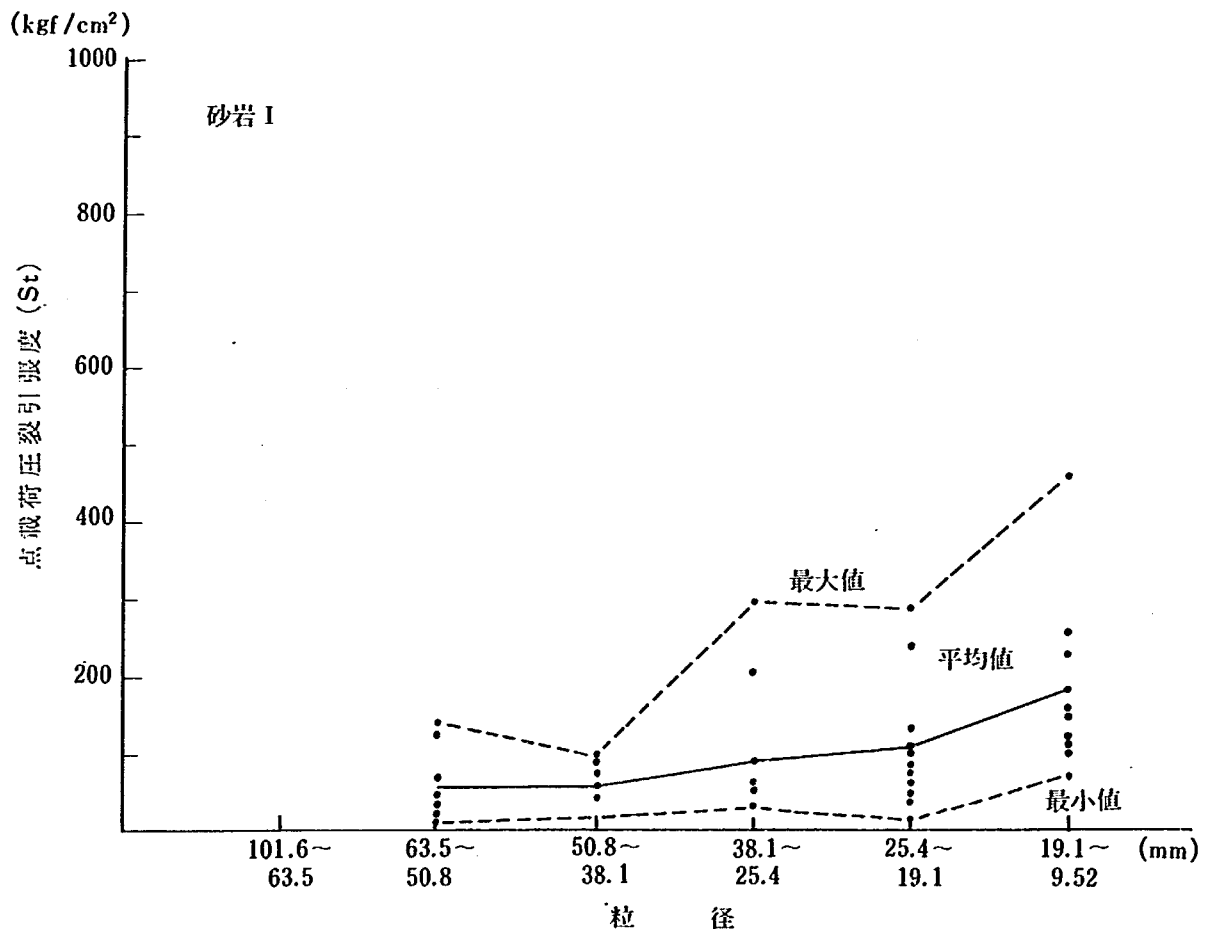


図 - 4. 39 (4) 粒子形状図 (輝緑凝灰岩・拘束状態乾湿前後)

点載荷圧裂強度を図－4.40～4.43と表－4.6で見ると砂岩Ⅰ・Ⅱおよび輝緑凝灰岩では代表点載荷圧裂強度は砂岩Ⅰで101.15kgf/cm²、砂岩Ⅱで210.79kgf/cm²、輝緑凝灰岩で102.69kgf/cm²であり、砂岩Ⅱが良質な岩質であり、砂岩Ⅰ・輝緑凝灰岩は同程度の強度を有する岩質であると言える。また、輝緑凝灰岩で乾湿繰返しが粒子強度に与える影響を調べるために、粒径63.5～38.1mmの3粒径の平均で比較したが、新鮮材料で70.62kgf/cm²が、48時間飽和後で55.7kgf/cm²であり、室内・自然乾燥で61.96kgf/cm²、室内・強制乾燥で73.77kgf/cm²、拘束・自然乾燥で63.53kgf/cm²、拘束・強制乾燥で59.80kgf/cm²とあまり顕著な差は出ていない。なお、拘束状態での試験個数が少なく拘束状態の試験結果の信頼性はかなり低い。

X線分析を輝緑凝灰岩の新鮮材と乾湿繰返し後で実施した結果を表－4.7に示す。X線分析結果を見ると新鮮材料では主に角閃石・斜長石・緑泥石が含まれており、粘土鉱物であるモンモリロナイト・緑泥石も含まれている。長期圧密後の試験後材料では、室内・自然乾燥、室内・強制乾燥、拘束・自然乾燥、拘束・強制乾燥後に2個ずつサンプリングし測定した結果を表－4.7で見ると、含まれる鉱物に差は無く数量が若干多く表われているが、実質上の差はない。



図－4.40 点載荷圧裂試験強度（砂岩Ⅰ）

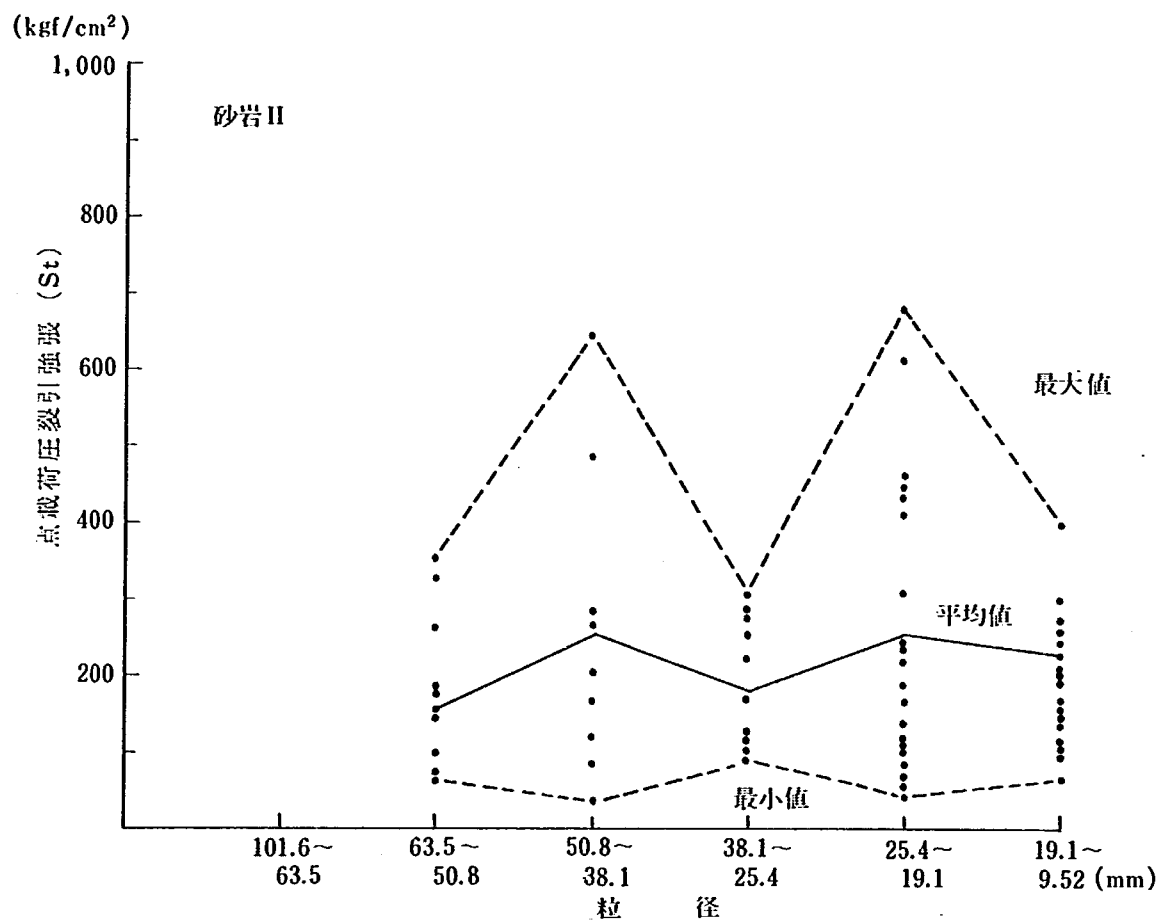


図 - 4. 41 点載荷圧裂試験強度 (砂岩 II)

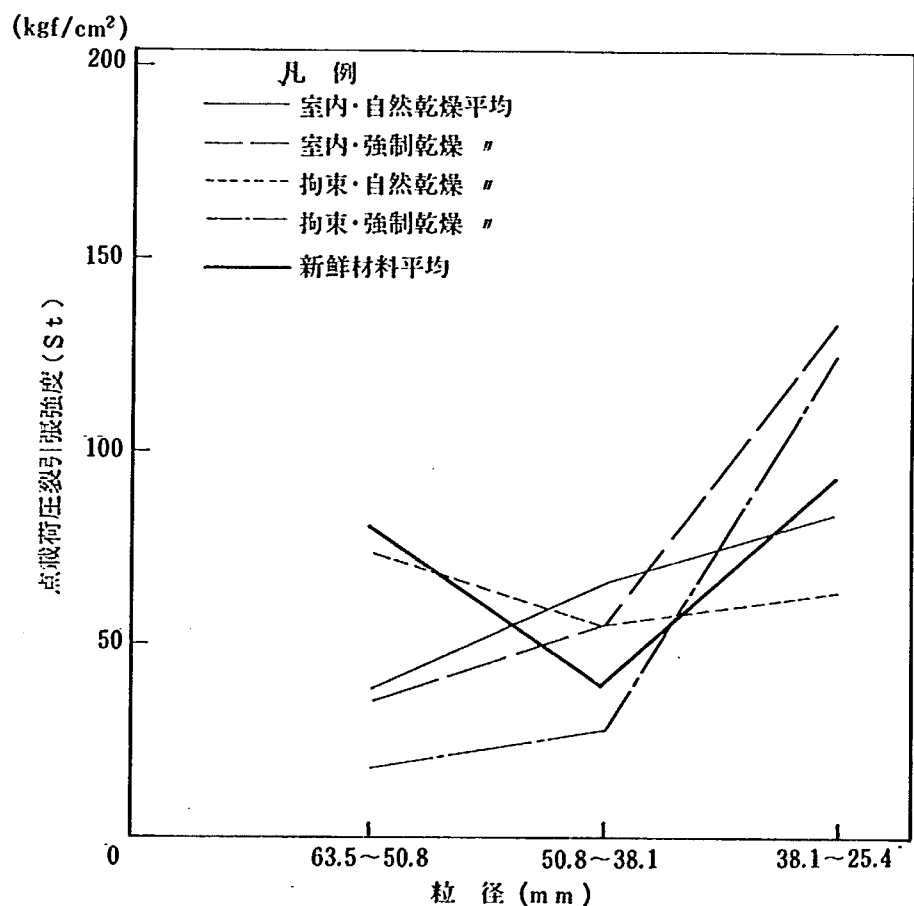


図 - 4. 42 点載荷圧裂試験強度 (輝緑凝灰岩・試験ケース別平均)

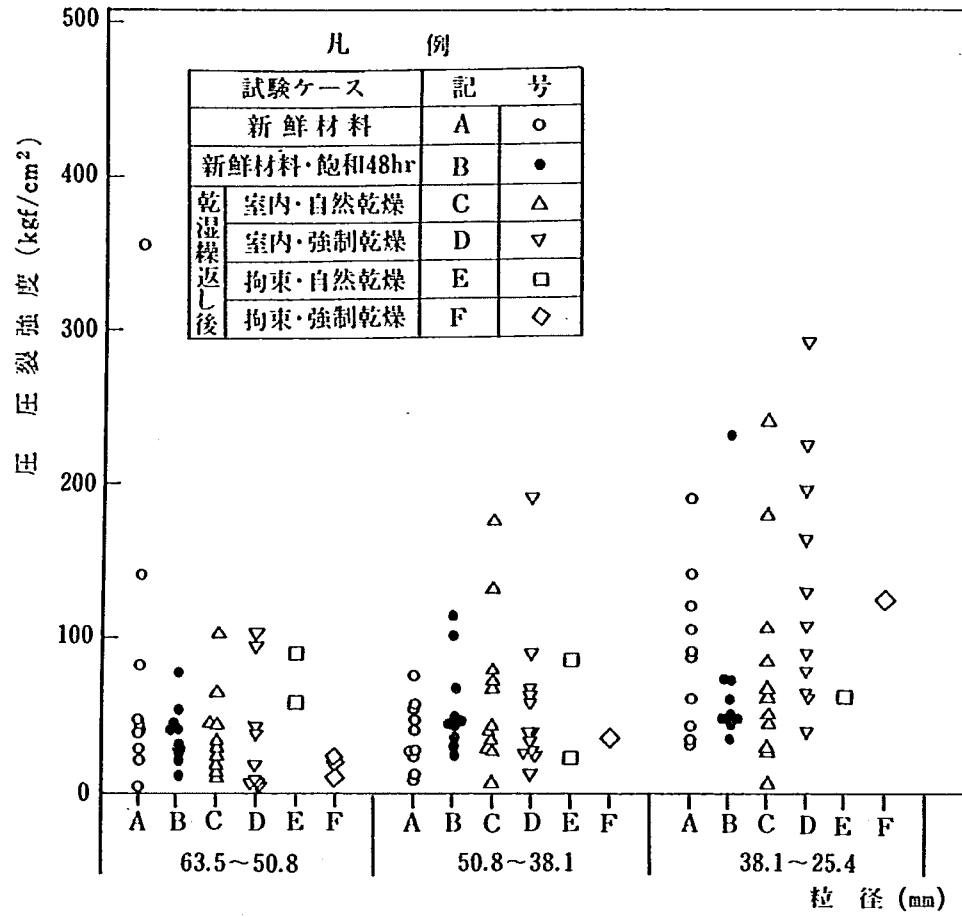


図 - 4. 43 点 載 荷 圧 裂 試 験 強 度 (輝 緑 凝 灰 岩 ・ 全 ケ ー ス)

表 - 4.7 X線分析結果一覧表

方 法	分 類	*投入直後の材料 鉱 物 名	* 新 鮮 材 料		乾 湿 繰 返 し 試 験 後 試 料					
			No1	No2	室 内 ・ 自 然 乾 燥		室 内 ・ 強 制 乾 燥		拘 束 ・ 自 然 乾 燥	拘 束 ・ 強 制 乾 燥
非 定 方 位 法	炭酸塩鉱物	方 解 石 Calcite	1 ?	1	2	1	2	1	—	3
		ド ロ マ イ ト Dolomite	—	—	3 ?	3 ?	3	2	3 ?	3 ?
	珪酸塩鉱物	石 英 Quartz	1	1	4	2	3	3	3	4
		角 閃 石 Amphibole	3	3	4	4	4	4	4	4
	長 石	斜 長 石 Plagioclase	3	3	4	3	4	4	4	4
		カ リ 長 石 K-Feldspar	1	1	2	2	2	3	2	2
	粘土鉱物	モンモリロナイト Montmorillonite	1	—	—	—	2	—	2	1
		緑 泥 石 Chlorite	2	2	3	3	4	3	3	3
		絹 雲 母 Sericite	—	—	1	—	1	—	1	—
		緑泥石/モンモリ —	—	—	—	—	—	3	—	—
		絹雲母/モンモリ —	—	—	—	—	—	—	—	—
	そ の 他	緑 レ ン 石 Epidote	1	1	—	—	—	—	—	—
定 方 位 法	無 処 理	炭酸塩鉱物								
		方 解 石 Calcite	—	—	1	1	1	1	1	—
		石 英 Quartz	—	1	1	1	1	1	1	1
		角 閃 石 Amphibole	3	3	3	4	4	3	3	3
		斜 長 石 Plagioclase	2	2	2	2	2	2	1	1
		カ リ 長 石 K-Feldspar	1	—	—	1	1	—	1	—
		モンモリロナイト Montmorillonite	2	2	4	2	1	4	4	4
		緑 泥 石 Chlorite	3	3	4	4	4	4	4	4
		絹 雲 母 Sericite	—	—	—	—	—	—	1	—
		緑泥石/モンモリ —	—	—	—	—	—	4	—	—
		絹雲母/モンモリ —	—	—	1	2	1	—	—	—
	E.G 処 理	炭酸塩鉱物								
		角 閃 石 Amphibole	3	3	4	4	4	4	4	4
		珪酸塩鉱物	斜 長 石 Plagioclase	1	1	1	1	1	1	1
		モンモリロナイト Montmorillonite	2	1	4	4	3	4	4	4
		緑 泥 石 Chlorite	3	2	4	4	4	4	4	4
		絹 雲 母 Sericite	—	—	1	—	—	—	1	—
		粘土鉱物	緑泥石/モンモリ —	—	—	—	—	4	—	—

注) ・不確定「?」について……実験値がその鉱物の回折角度と完全に合わないものの近い値を示し、
なおかつ他に適当と思われる鉱物が見当たらない場合にこの表示を
付記する。「1?」、「3?」がこれに該当する。

・鉱物名「A/B」について……実験値に鉱物Aと鉱物B共通の特性が出ているが、両者の片方があ
るのか、あるいは両者ともあるのか判定できない場合に表示される。
「緑泥石/モンモリ」、「絹雲母/モンモリ」がこれに該当する。

凡 例

4 ……多 量
3 ……中 量
2 ……少 量
1 ……微 量
? ……不確定

5. ま と め

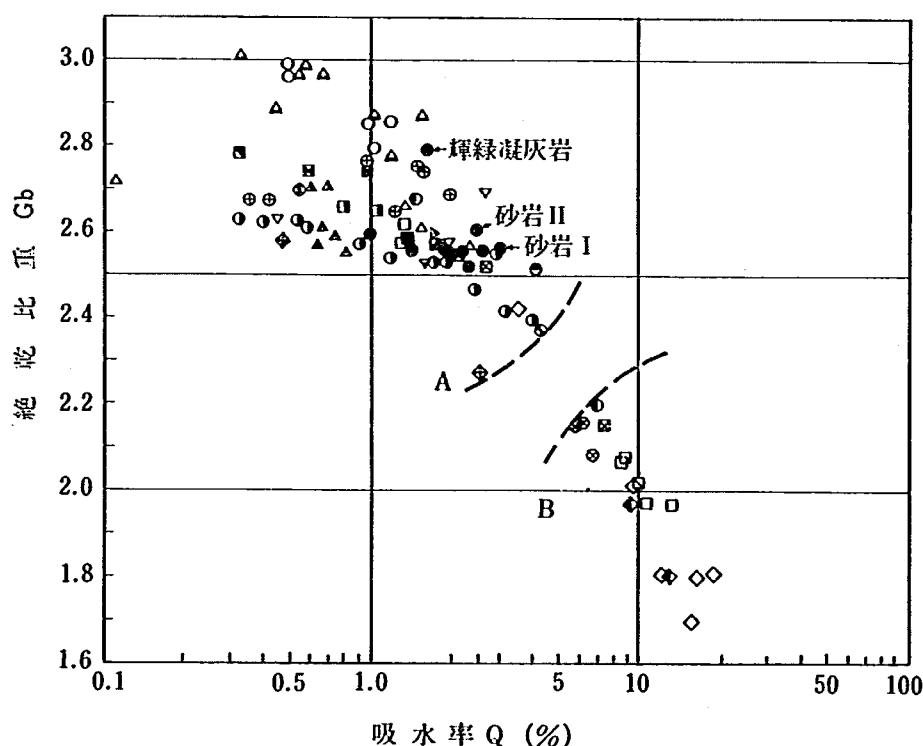
5.1 砂 岩

- (1) 物性値を平均絶乾比重 $\overline{Gb}$ ・平均吸水率 $\overline{Q}$ でみると各々，砂岩Ⅰで $2.554 \cdot 3.02\%$ ，砂岩Ⅱで $2.608 \cdot 2.03\%$ の値を示している。

砂岩Ⅰについては，絶乾比重・吸水率の値を通常のロック材料の場合と比較してみると品質が若干低下した材料であるため堤体材料として使用する場合には，ゾーニング等の配慮が必要であると考えられる。

砂岩Ⅱについては，物性値から判断して通常のロック材料として使用可能であると考えられる。

図－5.1 にロック材料の絶乾比重と吸水率に着目して整理した事例調査の結果を参考として示す。事例調査は，1970年代以降に竣工したフィルダム 25 個について調べた結果であり A グループ範囲にある岩は通常のロック材として一般に使用されているものである。



図－5.1 岩石の絶乾比重と吸水率の事例調査結果(6)
(A グループは通常のロック材として使用されているもの)

- (2) 締固まり傾向を見ると搬入時現場粒度が $U_c = 9$ であり，砂岩Ⅰでは最大間隙比が 0.558，最小間隙比で 0.236 で，いままでに土研で試験した他ダムのロック材料よりも速く締固まる傾向にあり，砂岩Ⅱでは最大間隙比が 0.578，最小間隙比で 0.285 である。最小間隙比時の破碎率が砂岩Ⅰで 11.1%，砂岩Ⅱで 3.3% であり砂岩Ⅰでの粒子の細粒化が顕著であるた

め、現場では転圧試験により、転圧機種・転圧回数などの条件を変え粒子の細粒化の影響を把握してから使用することが望ましい。ロックゾーンの排水機能から判断して透水係数は $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 以上であることが望ましい。

- (3) せん断強度について、せん断抵抗角値は砂岩Ⅰで $39.6 \sim 38.4$ 度、砂岩Ⅱで $43.7 \sim 42.3$ 度であり砂岩Ⅱ材料の方が大きな値を示している。また1個の粒子強度を点載荷圧裂試験で見ると、砂岩Ⅰで 101 kgf/cm^2 、砂岩Ⅱで 210 kgf/cm^2 と砂岩Ⅱの方が良質な岩であると言える。

粒子形状的には、砂岩Ⅰが板・塊状、砂岩Ⅱが板状と偏平な材料が多いと判断できる。

- (4) 盛立後の変形性は、密度により大きく影響されるので、現場盛立時の密度管理には十分注意を払う必要がある。

5.2 輝緑凝灰岩

- (1) 物性値では、平均絶乾比重で 2.843 ・平均吸水率で 1.67% と、輝緑凝灰岩の物性値としては一般的な値である。
- (2) 締固まり傾向は、現場搬入時粒度が $U_c = 22$ と良いため最大間隙比は 0.461 と、土研で今迄実施してきた結果としては非常に小さい方である。また、最小間隙比は 0.230 の値を示したが、最小間隙比はまだ締固まる傾向にあり、破碎率も本試験時の最小間隙比時で 3.3% と少なめであった。現場粒度は均等係数 $U_c = 22$ と大きく、細粒分が多く含まれる可能性があるため、ロック材としての排水性の点に注意する必要がある。
- (3) せん断強度的には、せん断抵抗角に着目すると不飽和試験で 42.3 度・飽和試験で、 39.4 度と両試験では約 3 度程度の強度差を生じた。長期載荷後の飽和試験では 45.2 度と大きな強度を示したが、側圧 0.25 kgf/cm^2 の粒子破碎が多かったことから判断して、粒子強度低下に伴って最大主応力差が小さ目に現われたことが、主な原因とも考えられる。しかし、2個の異なる側圧条件下での値で求めているのでデータ数の点からもせん断抵抗角についての信頼性は低いものと考えられる。また粒子の強度（点載荷圧裂強度）は、 102.69 kgf/cm^2 と砂岩Ⅰと同程度の値であった。
- (4) 岩石粒子の長期的な強度を重量損失率に着目してみた場合には、乾湿繰返しを与えることによって風化は促進されるが、拘束応力を載荷した状態で岩石粒子内の飽和度が 100% に近い状態では、風化は促進されにくくなる岩質である。乾湿を繰返した場合の粒子強度低下は今回の試験では、サンプリング個数の不足のため明確な傾向が現われなかった。以上より、輝緑凝灰岩はダム盛立ロック材として使用する場合には、岩石粒子内の飽和度が 100% から大きく変化しないロックゾーン内部に配置することが必要であると考えられる。
- (5) 透水係数は試験数量が少なく一様の傾向にはないが、拘束応力が低い状態では、載荷時間が長い場合でも透水係数は一定値であり、拘束応力が高い状態では、載荷時間が長くなるにつれ、透水係数は増加の傾向にあった。このように透水係数が増加傾向を示した原因としては、長期載荷時給排水により細粒子が流出したとも考えられる。

ロックゾーンが細粒な粒度組成となり、透水係数が小さくなると(目安として $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 以下)、貯水位の急低下によってロックゾーン内部に残留間隙水圧が発生する可能性もある。また、それに伴ってダムの安定性が低下するので注意する必要がある。

- (6) 変形性について、変形係数($E_{50} \cdot E_t$)でみると、不飽和試験での変形係数が大きく飽和状態の方が小さく現われている。
- (7) 鉱物組成から見ると、モンモリロナイト・緑泥石などの粘土鉱物が含まれているため、含水状態による材質の変化には十分注意を要する。また、X線分析結果より粒子鉱物が長期載荷試験期間中に変化した傾向は認められなかった。
- (8) 今回の試験では輝緑凝灰岩の長期強度特性を十分に把握するためには、試験数量が不十分であった。

しかし、岩石粒子の長期強度特性では岩石粒子の重量損失に与える要因の中で、特に飽和度の影響の概略を知ることが出来た。また、三軸圧縮強さに関する長期強度特性については、従来法による飽和(CD)試験に比較して長期載荷後飽和(CD)試験値の方が、やや小さ目になる傾向にあるが大きな差は認められない。今後は、特に岩石粒子内の飽和度変化と拘束条件に着目した、試験データの蓄積を計り、さらに長期強度に与える要因を明確にする必要があると考えられる。

5.3 設計参考値の検討

室内試験より得られたロック材料の物理的・力学的特性および、長期強度特性試験結果を参考としてロックゾーンの設計参考値(密度・せん断抵抗角)について検討する。

まず、ロック材料の対象岩種として砂岩と輝緑凝灰岩(砂質・泥質)の2種類がある。砂岩については、採取計画および採取可能量等から判断して砂岩Ⅱを対象とする。また、輝緑凝灰岩については、事務所の調査結果より砂質のものと泥質の2種に分類されているが泥質のものが採取可能量の約50%を占め、砂質に比較して泥質の方が品質が良くないため本試験で実施した泥質を対象とすることにする。

1) 密度

締固め試験より得られた最小間隙比(e_{min})を、他ダムのロック材料について試験して得られた値とともに図-5.2に示す。図より、通常のロック材料と同等な密度に締固め可能な材料であると考えられる。次に室内締固め試験で定義して得られた相対密度85%の密度は、現場施工可能密度として相対密度85%の密度を基本とする。

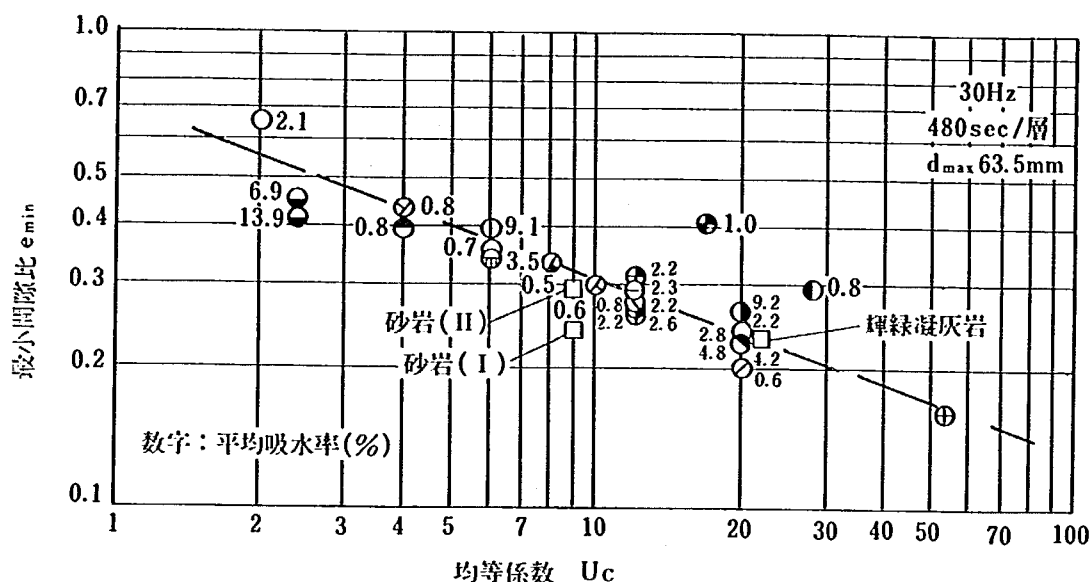


図 - 5.2 均等係数と最小間隙比

砂岩Ⅱの締固め試験より得られた最大間隙比 $e_{max} = 0.578$ ・最小間隙比 $e_{min} = 0.287$ より相対密度 85 %の間隙比を求めると $e_{85} = 0.331$ となる。次に平均絶乾比重 $\overline{G_b} = 2.608$ と $e_{85} = 0.331$ から乾燥密度を求めると $\gamma_d = 1.959 \text{ tf/m}^3$ が求まる。なお、最大・小間隙比を表 - 5.1 に示した。

表 - 5.1 最大・小間隙比表

間隙比 岩 種	最 大 e_{max}	最 小 e_{min}	相対密度 85 %時 e_{85}
砂 岩 I	0.558	0.236	0.284
砂 岩 II	0.578	0.287	0.331
輝緑凝灰岩	0.461 (1.946)	0.230	0.265

同様に輝緑凝灰岩で得られた $e_{max} = 0.461$ ・ $e_{min} = 0.230$ から相対密度 85 %の密度を求めると、平均絶乾比重 $\overline{G_b} = 2.843$ との関係から $\gamma_d = 2.247 \text{ tf/m}^3$ ($e_{85} = 0.265$)となる。

2) せん断抵抗角

せん断抵抗角の値については、三軸圧縮試験より得られた結果を基本とする。また、その他に原石山での岩質の均一性・材料の長期強度特性についても考慮して参考値に検討を加えることにする。

まず、三軸圧縮試験を実施した材料、砂岩Ⅰ、砂岩Ⅱ、輝緑凝灰岩の強度を図 - 5.3 に側圧と最大主応力差の関係で示す。最大主応力差の大きさの順番は輝緑凝灰岩の不飽和試験、砂岩Ⅱ ($Dr = 85\%$)、砂岩Ⅰ ($Dr = 85\%$)と砂岩Ⅱ ($Dr = 61\%$)、砂岩Ⅰ ($Dr = 54\%$)、輝緑

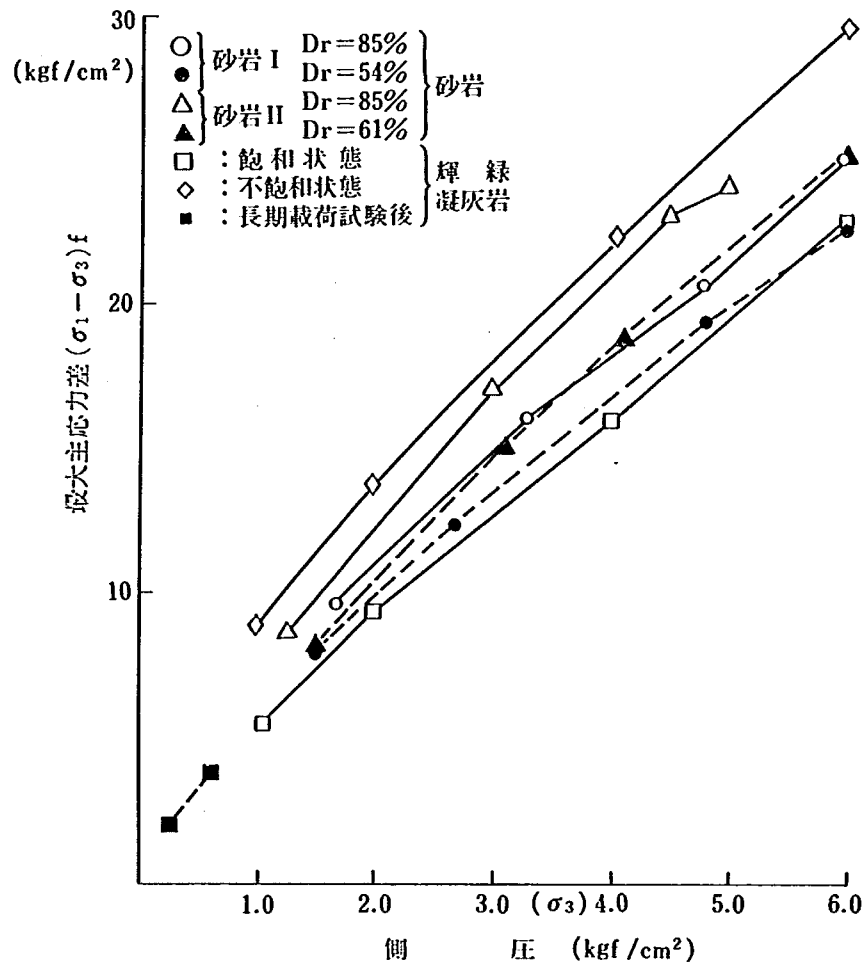


図 - 5.3 側圧と最大主応力差の関係図

凝灰岩の飽和状態であった。

次に同じ相対密度 ($Dr=85\%$) を目標として供試体を作成して得られた、最大主応力差の大きさについてみる。不飽和状態での砂岩と輝緑凝灰岩では、輝緑凝灰岩・砂岩Ⅱ・砂岩Ⅰの順に大きく現われている。また、輝緑凝灰岩の飽和状態 ($Dr=85\%$) が砂岩Ⅰの不飽和状態 ($Dr=54\%$) の結果と同程度の最大主応力差が現われている。

図 - 5.4 に三軸圧縮試験より求められた、圧密後供試体間隙比とせん断抵抗角の関係を示す。

ロック材料のせん断抵抗角は、試験条件・材料条件を統一した場合には、供試体の密度 (または間隙比) 状態に大きく影響される。

砂岩Ⅱの場合には、2種類の異なる供試体密度でのせん断抵抗角が求められている。そこで、ここでは圧密後間隙比 e_c とせん断抵抗角 ϕ_d の試験値から $e_{85}=0.311$ に対応する ϕ_d 値を直線関係で内挿して求めることにする。各々の試験値 $e_c=0.328$ で $\phi_d=43.7$ 度、 $e_c=0.399$ で $\phi_d=42.3$ 度の値より $e_{85}=0.331$ の値を求めると $\phi_d=43.65$ 度となる。せん断抵抗角の値は、密度状態の他に粒度組成・岩質の良否等によっても影響される。本試験では、一種類の粒度分布 ($U_c=7$) しか試験していないこと、採取時の粒度変動・岩質の変化等を考慮して 1.5 度程度の余裕を考慮して $\phi_d=42.5$ 度を参考値とする。

輝緑凝灰岩（泥質）については、飽和条件と不飽和条件での試験を実施した。その結果、飽和条件の方が不飽和条件の場合に比較して ϕ_d 値が約3度小さく現われた。堤体盛立て後の材料状態を考慮して飽和条件（水面下またはそれに近い状態）を基本として検討を加えることにする。輝緑凝灰岩の場合には1種類の間隙比条件についてしか試験していないので相対密度85%の間隙比 $e_{85}=0.265$ に対応した ϕ_d 値は、 $e_c=0.241 \cdot \phi_d=39.4$ 度の試験値と下記に示す最上の式⁷⁾を用いて求めることにする。試験値を次式に代入して材料定数を求めると $k_t=0.66605$ となる。

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

ϕ : せん断抵抗角

e : 間隙比

k_t : 試験より得られる材料定数

次に上式に $e_{85}=0.265$ を代入すると $\phi_d=38.7$ 度が求められる。輝緑凝灰岩についても砂岩Ⅱと同様に一種類の均等係数($U_c=22$)しか実施していないこと、また、岩質的にも変質が認められるとともに長期強度特性については本試験結果の範ちゅうでは詳細に解明されていない点を考慮して通常のロック材料の場合に比較して若干大きな余裕を考慮して $\phi_d=37.0$ 度を参考値とする。

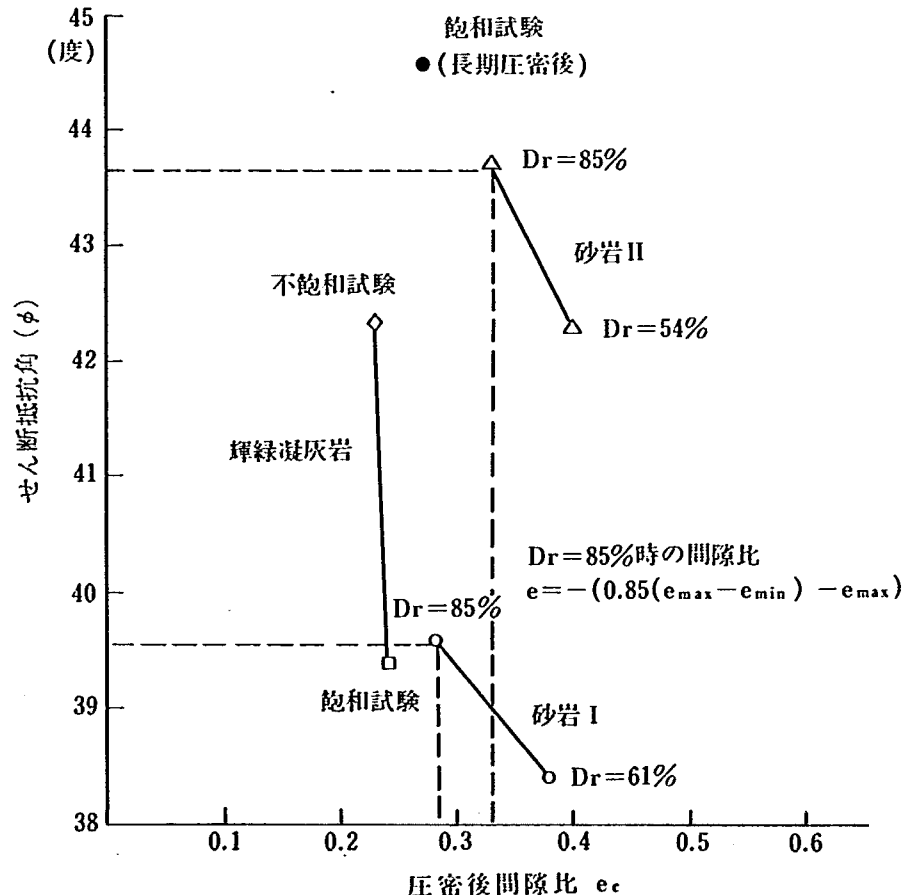


図 - 5.4 圧密後間隙比とせん断抵抗の関係図

3) 設計参考値

上述したロックゾーンの密度とせん断抵抗角の設計参考値を表－5.2に整理して示す。

表－5.2 ロックゾーンの設計参考値

岩 種	範 囲	絶 乾 比 重	乾 燥 密 度	せん断抵抗角
砂 岩 II	外部ロック	2.608	1.959 tf/m ³	42.5 度
輝緑凝灰岩	内部ロック	2.843	2.247 tf/m ³	37.0 度

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：土質試験法，PP. 495～522，1979
- 2) R. J. Marsal：Mechanical Properties of Rockfill. Enbankment－Dam Engineering, Casagrande Volume, PP. 130～132, 1972
- 3) 土木学会監修：土質力学，粒状体の力学・粒状体の構造 PP. 893～903
播田一雄，豊田光雄：ロック材料の粒子形状試験，土木研究所資料 第1659号，1981. 3
- 4) 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
- 5) 土木学会岩盤力学委員会第4分科会：昭和55年1月17日「X線粉末回折による鉱物の同定法」
- 6) 松本徳久，渡辺和夫，吉野内真二：ロック材料の調査・設計・施工に関する事例調査，土木研究所資料 第1839号，1982. 7
- 7) 土木学会監修：土質力学，粒状体の力学・統計的理論 PP. 998～1036

羽地ダムロック材料の
材料試験報告

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 2209 号
昭和 60 年 3 月 (1985)
松 本 徳 久
渡 辺 和 夫
小 川 優

キーワード フィルダム, ロック材料, 大型三軸試験, 長期強度, 乾湿繰返し

要 旨 羽地ダム(沖繩開発庁・北部ダム事務所)の堤体材料として
使用予定のロック材料(砂岩・輝緑凝灰岩)について実施した物理試
験・力学試験結果をとりまとめている。試験結果より, 2 岩種の物理
・力学特性から判断して堤体ロック材料として使用可能と考えられる。
しかし, 輝緑凝灰岩については長期安定性を考慮したゾーニング設計
が必要である等を提案している。

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
フィルダム研究室
御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2209号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印