

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第2829号
033

土木研究所資料

コンクリートのせん断強度について の実験的考察(その1)

平成2年3月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

「Copyright © (1990) by P. W. R. I.

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

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

コンクリートのせん断強度について の実験的考察（その1）

ダム構造研究室 室長 永山 功
研究員 渡辺 和夫
小林 政登

要 旨

本報告は、重力式コンクリートダムの構造設計に用いられる堤体コンクリートの一軸圧縮強度とせん断強度の関係について、実験的検討を行った結果をとりまとめたものである。

実験結果より、コンクリートのせん断強度はモール・クーロンの破壊基準で近似することができ、またこれによってコンクリートの一軸圧縮強度とせん断強度の関係を対応づけられることがわかった。また、打継目部のせん断強度については、これに対して丁寧な処理を行えば、一般部のせん断強度と遜色ない値が得られることがわかった。

キーワード：重力式コンクリートダム，せん断試験，せん断強度，一軸圧縮強度，
打継目強度

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 せん断試験装置の概要	2
2.2 試験項目	6
2.3 試験仕様	6
3. 試験結果	12
3.1 せん断強度と一軸圧縮強度, 引張強度の比較	12
3.2 一般部と打継目部のせん断強度の比較	18
3.3 打継目の処理方法とせん断強度	21
3.4 せん断時のひずみ測定	30
4. まとめと考察	49
参考文献	49

1. はじめに

コンクリートダム の 堤体コンクリートの設計基準強度は、材令 91 日のコンクリートの圧縮強度に基いて定めることにしており、この値は堤体内に発生する応力に対して所要の安全率を有するものでなければならない¹⁾。重力式コンクリートダムに生じる最大圧縮応力は、一般に最大断面の下流端堤趾部に生じるため²⁾、堤体コンクリートの設計基準応力は、この下流端堤趾部の圧縮応力に基いて定められていることが多い。一方、現行の設計基準では、このほか、堤体の任意の水平断面に対して、Henny の式によって求めたせん断摩擦安全率が所要の値を満足することを併せて規定している³⁾。したがって、水平打継目が一般部のコンクリートに対して強度的に劣っていると考えられるような場合には、このような水平打継目に対する強度評価とそのせん断摩擦安全率の確認が設計上必要となってくる。このように、重力式コンクリートダム の 堤体コンクリートの強度評価は、圧縮強度とせん断強度の 2 つに対して行うことが必要である。

ダム構造研究室では、コンクリートの圧縮強度とせん断強度の関係を調査するため、圧縮試験機に取付けた簡単にせん断試験を実施できる簡易型の一面せん断試験用治具を製作した。本報告書は、この装置を用いて、コンクリートの一軸圧縮強度とせん断強度の関係について検討した結果、また打継目のせん断強度については、その処理方法がせん断強度におよぼす影響について検討した結果をとりまとめたものである。

2. 試験方法

2.1 セン断試験装置の概要

セン断試験の方法には、①あらかじめ供試体中にセン断面を規定し、この面に対してセン断力を作
用させて直接セン断強度を求める直接セン断試験法（一面セン断試験など）と、②供試体に軸差応力
を作用させてセン断破壊を生じさせるようなセン断応力を発生させ、その時の主応力の大きさからセ
ン断強度を計算によって求める間接セン断試験法（二軸、三軸試験など）がある。いずれの試験方法
を用いるかは、試験の目的・条件によって異なり、それぞれの状況に応じて適切な試験方法が選択さ
れている。

今回の試験では、打継目等の特定のセン断面を対象にセン断試験を行う必要があることから、その
試験方法として直接セン断試験を行うものとし、また建設現場や実験室内で簡単にセン断試験ができ
るように、ダム構造研究室で開発・製作した一面セン断用治具を利用して、圧縮試験機によってセン
断強度を測定する方法を採用した。このセン断用治具は、図-1に示すような構造をもち（供試体には、
円柱と角柱の二種類がある）、図-2 および写真-1 に示すように圧縮試験機に取付けて、想定セン断
面に垂直力とセン断力を同時に載荷するものである。また、載荷方向とセン断面との傾斜角（セン断
角度） β は、セン断用治具と上下のスペーサーをそれぞれ取り変えることによって変化させることが
でき、今回の実験では、 $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ の 6 角度を設定した。

破壊時にセン断面に作用する垂直応力 σ とセン断応力 τ は、(1)式によって算出することができる。

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P}{A} \sin \beta \\ \tau &= \frac{P}{A} \cos \beta\end{aligned}\dots\dots\dots (1)$$

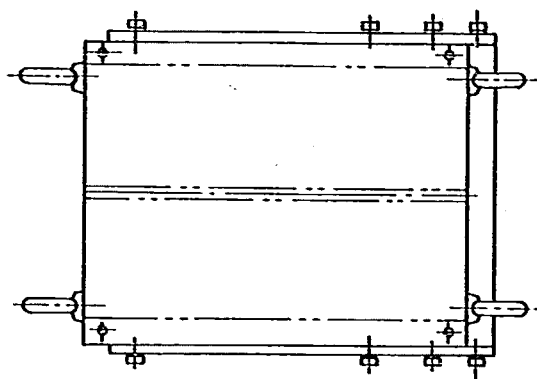
ここに、

P：破壊荷重

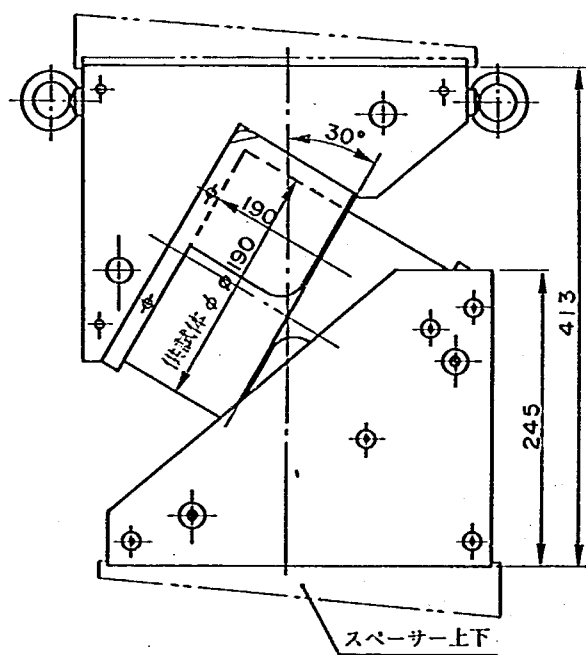
A：セン断面積（想定セン断面の面積）

したがって、種々のセン断角度 β に対して、試験結果を図-3のように破壊時の垂直力 σ とセン断
応力 τ の関係で整理すれば、セン断強度（ $\tau = \tau_0 + f \cdot \sigma$ ）を求めることができる。

平面



正面



側面

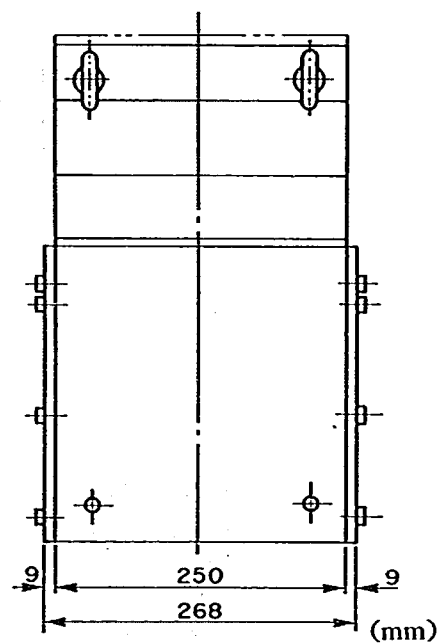


図-1 せん断用治具 ($\phi 190 \times H190\text{mm}$)

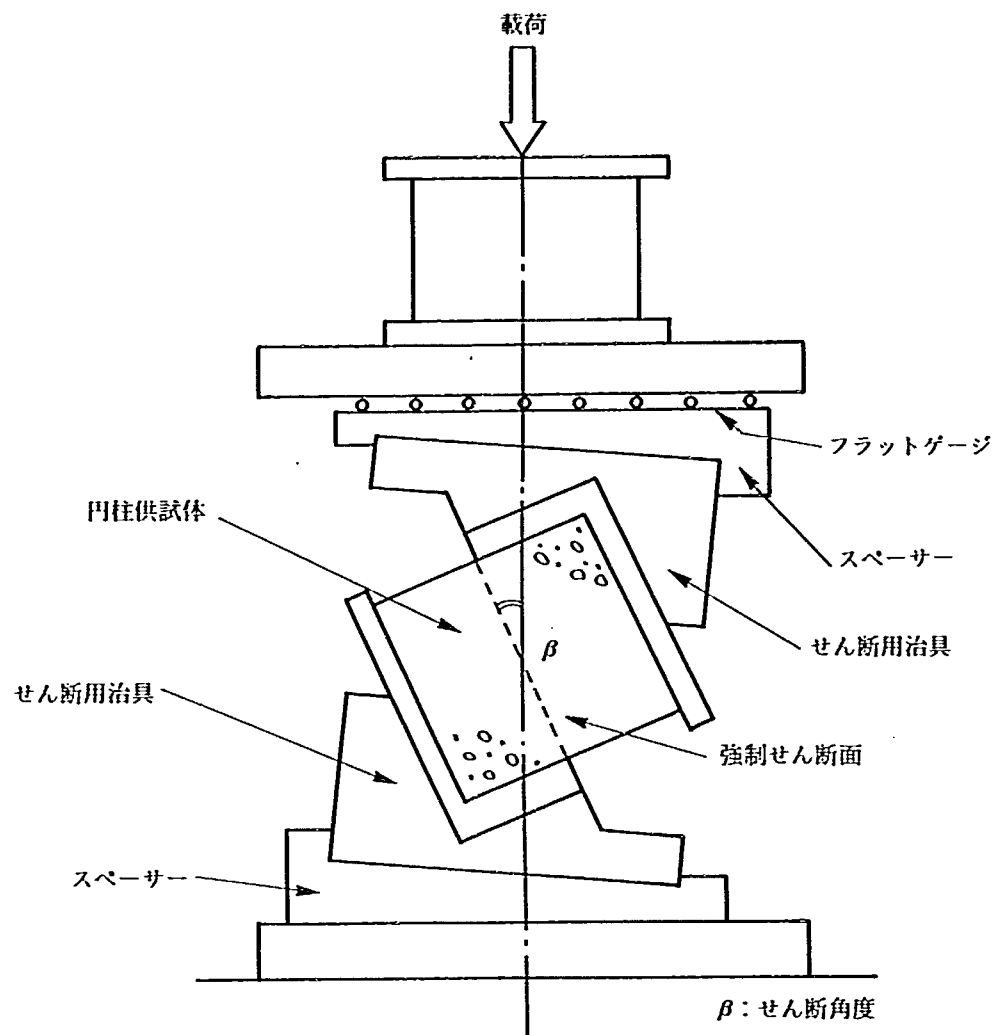


図-2 一面せん断試験機概略図

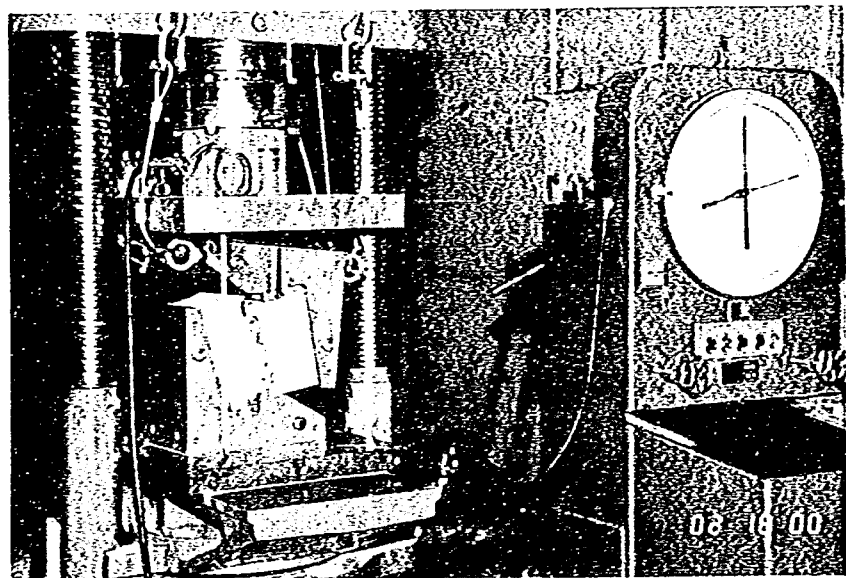


写真-1 圧縮試験機に取り付けた一面せん断試験用治具

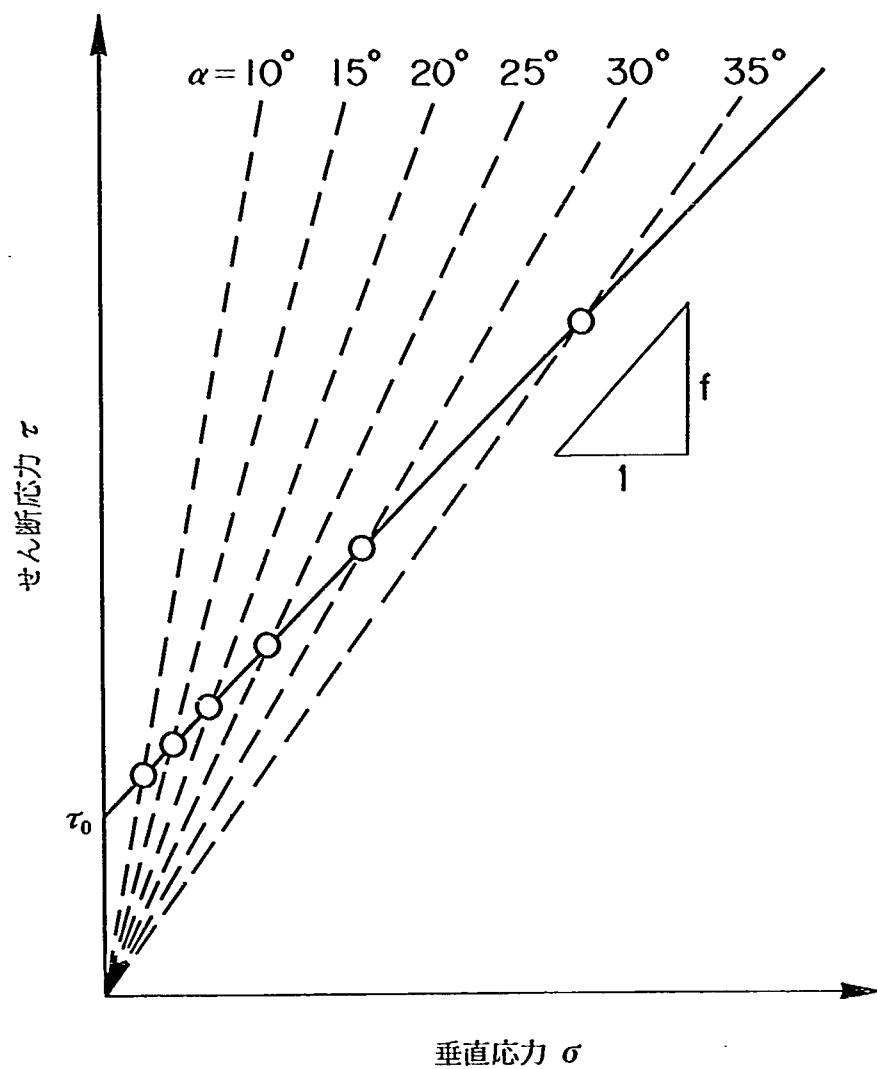


図-3 せん断試験結果の整理方法とせん断強度の求め方

2.2 試験項目

今回の試験では、以下の項目について検討を行うものとした。

1) 一軸圧縮強度とせん断強度の関係

コンクリートダム of 構造の安全性を確認する Henny の式を誘導する過程で Henny が述べているように³⁾、コンクリートの一軸圧縮試験時の破壊形態がせん断破壊であると考え、せん断破壊試験によって求められるせん断強度と一軸圧縮強度との間には、ある種の対応関係があるものと考えられる。したがって、一軸圧縮試験より求められる圧縮強度と一面せん断試験より求められるせん断強度の関係について比較検討する。

2) 一般部と打継目部のせん断強度の比較

重力式コンクリートダムは、一般に従来工法では 1.5 m、RCD 工法では 0.75 m を 1 リフトとして打設されている。このとき生じるリフト間の水平打継目は、構造上の弱点となりやすいことから、その施工にあたっては十分な養生とグリーンカットを行い、また丁寧にモルタルを塗り込んでから次のリフトを打設し、構造の一体化を図っている。したがって、水平打継目部が十分な強度を有しているかどうかを確認するため、一般部（リフト内を指す）と水平打継目部のせん断強度について比較検討する。

3) 水平打継目の処理方法とせん断強度の関係

水平打継目に対しては、一般に構造上の一体化を図るため、リフト表面のレイタンス、浮き石および汚れ等の除去を目的として、モータースーパーやジェット水によるグリーンカットが行われている。しかし、このグリーンカットの作業は、打設工程に大きな影響を及ぼすことから、可能な範囲での省力化が望まれている。したがって、従来のグリーンカットに加えて、グリーンカットを省略した場合のせん断強度について比較検討する。

2.3 試験仕様

1) コンクリートの配合

せん断試験に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。この配合は 7 つの重力式コンクリートダムの内部コンクリートの配合事例を参考に決定したものである。また、打継目面に塗り込む敷きモルタルの配合は 5 つの重力式コンクリートダムの事例を参考に決定したものである。

2) 供試体の種類

次に試験ケースを表-2 に示す。供試体は打継目を有しない供試体（以下、一般部供試体という）と打継目を有する供試体（以下、打継目部供試体という）に分けられ、一般部供試体では試験材令を変えたケースについて試験を行い、打継目部供試体の試験では打継目処理方法を変えたケースについて試験を行い、その影響について検討するものとした。供試体作製のための型枠としては、角柱供試体（150×150×150 mm）用型枠と円柱供試体（ ϕ 190×H 190 mm）用型枠を新たに開発した。この型枠は、打継目がせん断面に一致するように、図-4、5 に示すような分割型枠となっている。

表-1 コンクリートの配合とモルタル配合

	最大骨材 最粗寸法 Gmax (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細材料率 S/a (%)	単 位 量 (Kg/m³)						
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗 骨 材 G			AE 剤 (%)
									5 mm ┌ 10 mm	10 mm ┌ 20 mm	20 mm ┌ 40 mm	
せん断供試体	40	4±1	4±1	60	35	148	247	660	318	484	471	0.025
敷モルタル	5	—	—	50	100	266	532	1420	—	—	—	—

表-2 供試体の種類

ケース	供試体	グリーンカット*	敷モルタル**	目標材令
A	角柱 一般部	—	—	28 日
B	角柱 一般部	—	—	91 日
C	円柱 一般部	—	—	91 日
D	角柱 打継目部	ワイヤーブラシ	1.0 cm	91 日
E	角柱 打継目部	ジェット水	1.0 cm	91 日
F	角柱 打継目部	—	1.0 cm	91 日
G	モルタル	—	—	91 日

* 下部コンクリート打込み 24 時間後

** 上部コンクリート打込み直前

(上部コンクリートの打込みは下部コンクリート打込み 48 時間後とする)

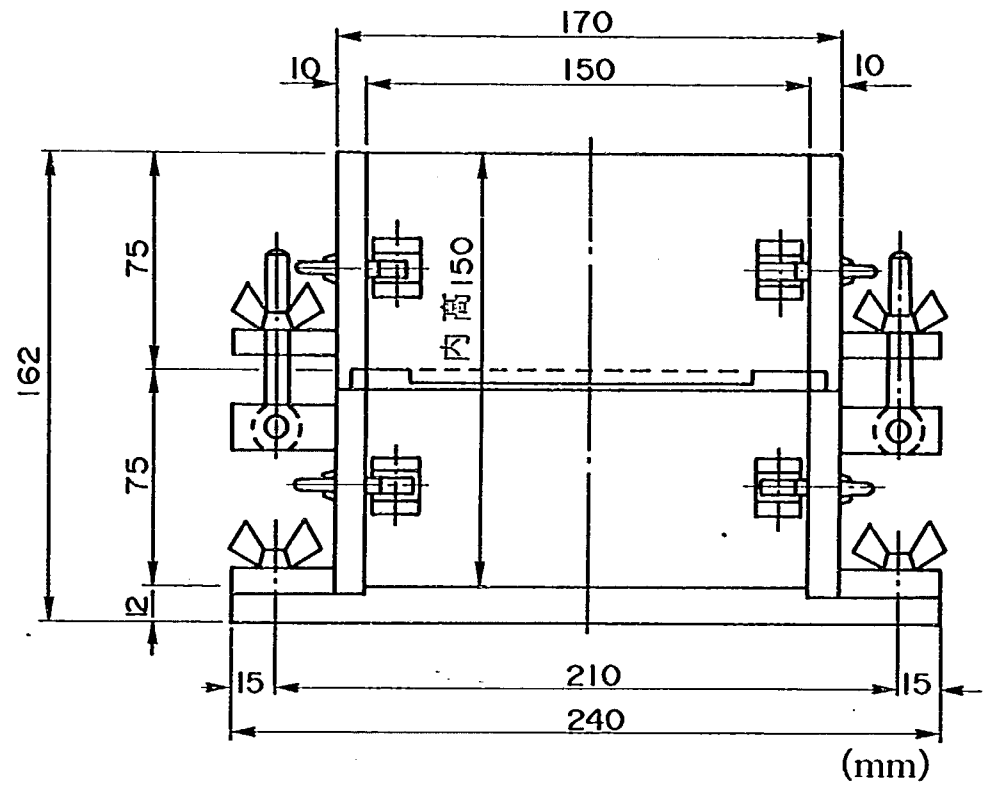


圖-4 角柱供試體製作用型枠

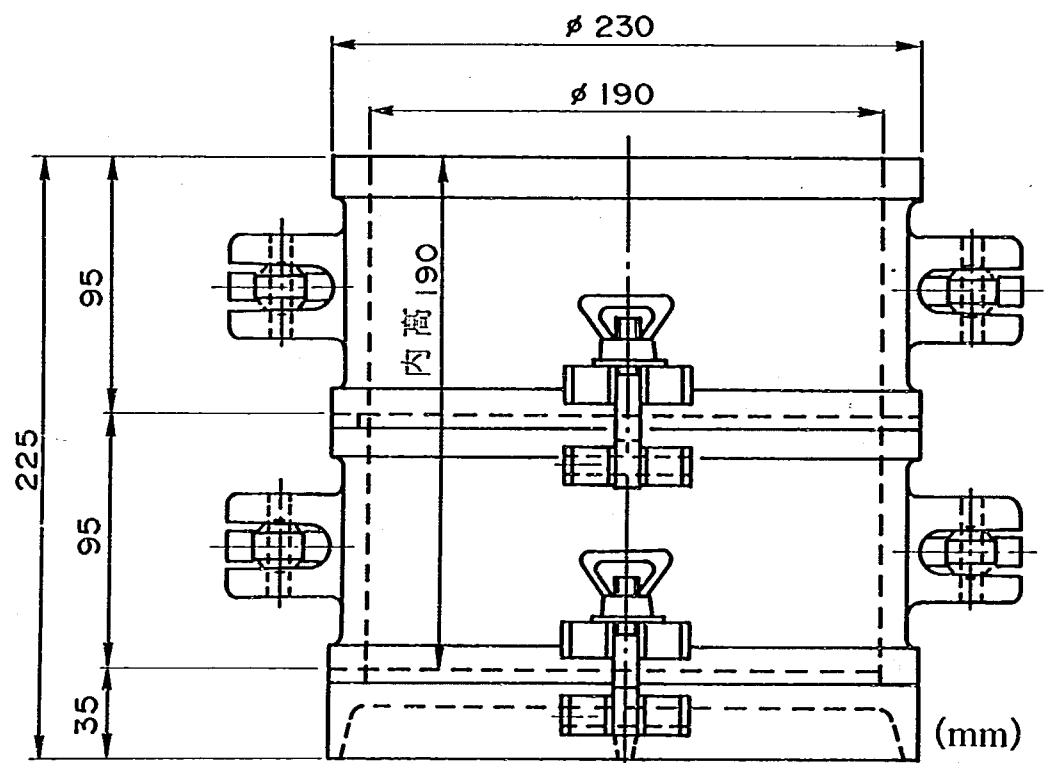


圖-5 円柱供試體製作用型枠

3) せん断角度

せん断試験時のせん断角度は、せん断用治具（二種類）とスペーサー（二種類）によって設定できる全ての角度とし、具体的には 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 35° の 6 角度とした。

4) 試験本数

供試体の本数は、試験結果のバラツキを考慮して 1 角度あたり 5 本ずつとする。なお一般部の試験では、JIS の試験方法に準拠して圧縮試験、割裂引張試験を併せて行った。

5) せん断載荷速度

供試体への載荷速度は、JIS の割裂試験法の場合と同じ速度とし、毎分 5 kgf/cm^2 とした。

6) 打継目作製時の打設間隔

打継目を有する供試体の上部コンクリートの打込みは、下部コンクリートの打込みから 48 時間後とした。また、打継目への敷きモルタルの塗り込みは、打設面を水で洗った後、布で水を拭き取り、打継目が湿っている状態で行うものとし、モルタルの厚さは 1 cm 程度になるようにした。なお、供試体は上部コンクリートを打設した後、水中養生するものとした。

7) グリーンカットの方法

グリーンカットは、ワイヤーブラシでレイタンスを除去する方法と元圧 35 kgf/cm^2 の水圧ポンプによって打設面にジェット水を吹き付ける方法の 2 種類とした。なお、グリーンカットは下部コンクリートの打込み後 24 時間後に行うものとした。

8) ひずみ測定

角柱供試体は、その側面がフラットであるため、この側面にひずみゲージを貼ることによってせん断試験時のひずみ測定を行うことができる。したがって、図-6 に示すような三方向抵抗線型ひずみゲージ ($\ell=20 \text{ mm}$) を用いてひずみを計測し、主応力の方向と大きさを求めるものとした。ひずみゲージは図-7 の回路を構成し、その測定原理は次のとおりである。すなわち、R1 は被測定物に貼られたひずみゲージ（アクティブゲージ）であり、載荷重によるひずみと温度変化によって生じるひずみが測定される。一方、R2 は温度補償用として被測定物と同一材料で作られた無負荷状態の供試体に貼られたひずみゲージ（ダミーゲージ）であり、温度変化によって生じるひずみのみが測定される。したがって電流計 G に流れる電流を求めれば、アクティブゲージとダミーゲージの差、すなわち載荷重によって生じたひずみが測定される。今回の一面せん断試験では、別の無載荷の供試体にひずみゲージを貼り付け、ダミーゲージとして利用した。

供試体に貼るひずみゲージの枚数は、供試体の片面にそれぞれ 3 枚、合計で 6 枚とする。ひずみゲージを貼る箇所は、供試体側面の強制せん断面上とし、供試体の端部と中央部とする（図-8 参照）。

次に、測定されたひずみから応力を算出するには、式(2)を用いる。

$$\sigma_v = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_v + \nu \epsilon_H) \dots\dots\dots (2)$$
$$\sigma_H = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_H + \nu \epsilon_v)$$

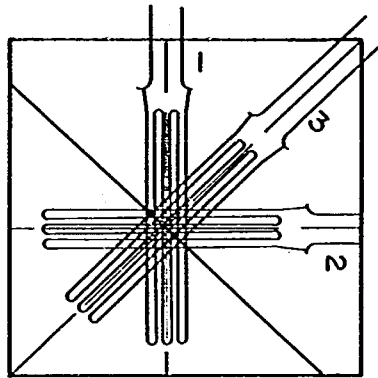
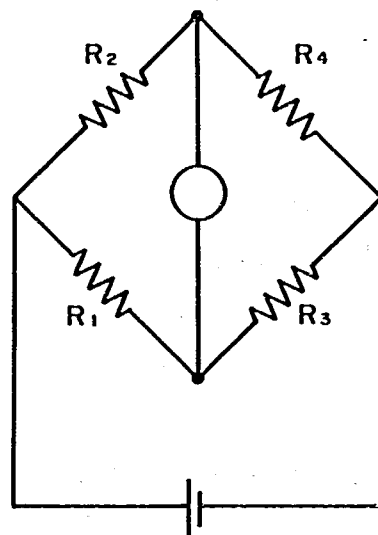
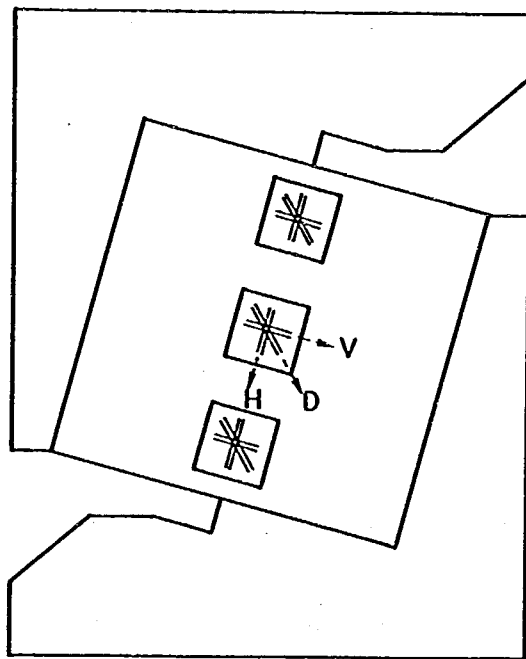


図-6 三方向抵抗線型ひずみゲージ



- R_1 : ひずみゲージ (active gage)
- R_2 : 温度補償用ひずみゲージ (dummy gage)
- R_3 : 固定抵抗
- R_4 : 固定抵抗
- G : 電 流 計

図-7 ホイートストンブリッジ回路



V：せん断面に直交方向のひずみ

D：斜め方向のひずみ

H：せん断方向のひずみ

図-8 ひずみゲージの貼付け位置

ここに、

σ_v ：せん断面に直交方向の応力（圧縮を正）

σ_H ：せん断方向の応力（圧縮を正）

E：供試体の弾性係数

ν ：供試体のポアソン比

ε_v ：せん断面に直交方向のひずみ（収縮を正）

ε_H ：せん断方向のひずみ（収縮を正）

である。また、図-8において、斜め方向の応力 σ_D を用いれば、せん断方向のせん断応力 τ_{HV} は、

$$\tau_{HV} = \sigma_D - \frac{\sigma_H + \sigma_v}{2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表わされ、また ε_D 方向に直交する方向のひずみを ε_D' とすれば、

$$\sigma_D = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_D + \nu \varepsilon_D') \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。一方、

$$\varepsilon_D + \varepsilon_D' = \varepsilon_v + \varepsilon_H$$

であるから、結局せん断応力 τ_{HV} は

$$\tau_{hy} = \frac{E}{1+\nu} \left(\epsilon_D - \frac{\epsilon_v + \epsilon_H}{2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

より求められることになる。また、主応力の大きさと方向は、

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_H) \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_H - \sigma_v}{2} \right)^2 + \tau_{hy}^2} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_H) \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_H - \sigma_v}{2} \right)^2 + \tau_{hy}^2} \dots\dots\dots (6) \\ \theta &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2 \tau_{hy}}{\sigma_H - \sigma_v} \end{aligned}$$

で表される。

3. 試験結果

3.1 セン断強度と一軸圧縮強度、引張強度の比較

本試験は、一般部供試体を用いて、コンクリートのせん断強度と一軸圧縮強度の関係を求めることを目的としたものである。一般部を対象とした試験ケース A, B, C (表-2 参照) のせん断試験結果を表-3 と図-9, 10, 11 に示す。ケース A, B は角柱供試体を用いてそれぞれ材令 28 日と 91 日について試験を行ったものである。また、ケース C は円柱供試体を用いて材令 91 日についての試験を行ったものである。またそれぞれの図には、JIS の試験方法によって求めた同材令の一軸圧縮強度 σ_c と引張強度 σ_t をモールの応力円で示してある。

これらの図より、一般部のせん断強度を表す破壊基準線は、引張強度を表すのモールの応力円より大きく上回っているが、圧縮強度を表すモールの応力円に対しては若干交差するもののほぼこれに接しており、両者により対応があることがわかる。なお角柱供試体と円柱供試体による供試体形状の差は認められず、いずれの場合にも良好な試験結果が得られることがわかる。

以上の結果より、純せん断強度 τ_0 と一軸圧縮強度の σ_c 関係についてまとめると

$$\tau_0 = \frac{1}{5.6} \sigma_c \dots\dots\dots (28 \text{ 日強度, 角柱供試体})$$

$$\tau_0 = \frac{1}{5.2} \sigma_c \dots\dots\dots (91 \text{ 日強度, 角柱供試体})$$

$$\tau_0 = \frac{1}{5.8} \sigma_c \dots\dots\dots (91 \text{ 日強度, 円柱供試体})$$

となり、その比は 1/5.2~1/5.8 とほぼ一定の関係となっている。

次に、せん断された破壊面の状態を図-12 に、また代表的な例を写真-2 に示す。一般部のせん断破壊面は、全体的に凹凸が大きく、これは粗骨材の影響と考えられる。また、せん断角度が小さい供試体では供試体の側面にほとんど亀裂は入らないが、せん断角度が 25°, 30° の場合には供試体の側面に数多くの亀裂が現われる傾向が見られた。

表-3 一般部のせん断試験結果〔ケース A~C〕

試 ケ ー ス	目 録 材 試 令	試 材 試 令	供 番 試 体 号	$\beta=10^\circ$		15°		20°		25°		30°		35°		せん断強度	
				σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	τ_0	ϕ
A (角柱)	28 日	26 { 29 日	1	10.6	59.9	18.6	69.5	36.5	100.2	55.2	118.4	74.4	128.9	108.1	154.4	50.9 Kgf/cm ²	46.1°
			2	8.9	49.9	18.2	67.8	32.5	89.4	56.5	121.2	85.3	147.8	115.5	164.9		
			3	9.3	52.5	19.9	74.3	30.2	83.1	50.9	109.2	75.6	130.9	115.2	164.6		
			4	9.3	52.5	18.2	67.8	33.1	91.0	45.5	97.5	83.1	143.9	113.7	162.4		
			5	7.7	43.8	17.9	67.0	34.2	93.9	49.8	106.7	72.9	126.2	123.4	176.2		
			平均	9.2	51.7	18.6	69.3	33.3	91.5	51.6	110.6	78.3	135.5	115.2	164.5		
B (角柱)	91 日	110 { 125 日	1	12.5	70.9	24.8	92.7	33.1	91.0	58.6	125.7	103.6	179.4	147.9	211.1	68.3 Kgf/cm ²	45.2°
			2	12.7	71.8	27.7	103.5	43.9	120.7	74.0	158.7	88.9	153.9	151.7	216.6		
			3	13.1	74.4	25.1	93.6	44.5	122.4	67.6	145.0	95.1	164.7	151.4	216.3		
			4	13.5	76.6	22.3	83.3	35.3	96.9	71.8	153.9	98.4	170.5	139.7	199.5		
			5	13.7	77.5	26.9	100.5	42.0	115.3	74.2	159.1	94.7	163.9	148.4	211.9		
			平均	13.1	74.2	25.4	94.7	39.8	109.3	69.2	148.5	96.1	166.5	147.8	211.1		
C (円柱)	91 日	92 { 130 日	1	10.7	60.5	22.1	82.5	31.2	85.8	61.1	131.1	85.0	147.3	146.5	209.3	56.3 Kgf/cm ²	47.6°
			2	11.6	66.0	19.4	72.3	38.6	106.1	67.6	144.9	91.92	159.21	157.7	225.2		
			3	12.8	72.6	19.4	72.3	33.9	93.1	50.4	108.1	79.75	138.13	154.0	220.0		
			4	10.5	59.8	23.0	85.9	41.0	112.7	55.2	118.3	89.9	155.85	169.2	241.7		
			5	11.1	62.9	19.2	71.6	37.3	102.4	58.6	125.7	94.22	163.19	167.9	239.9		
			平均	11.3	64.4	20.6	76.9	36.4	100.0	58.6	125.6	88.18	152.74	159.1	227.2		

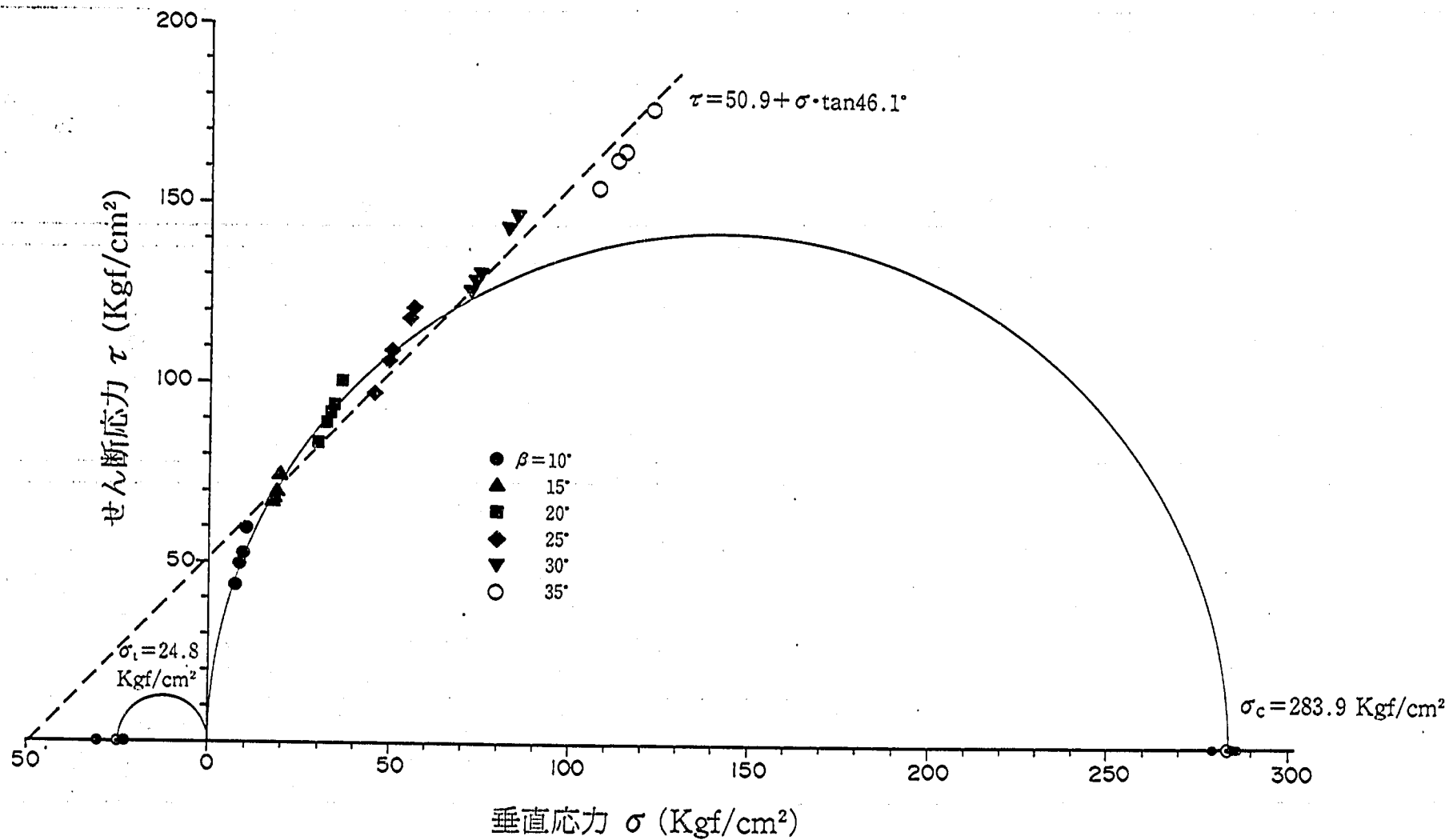


図-9 一般部のせん断強度〔ケースA：角柱・目標材令28日〕

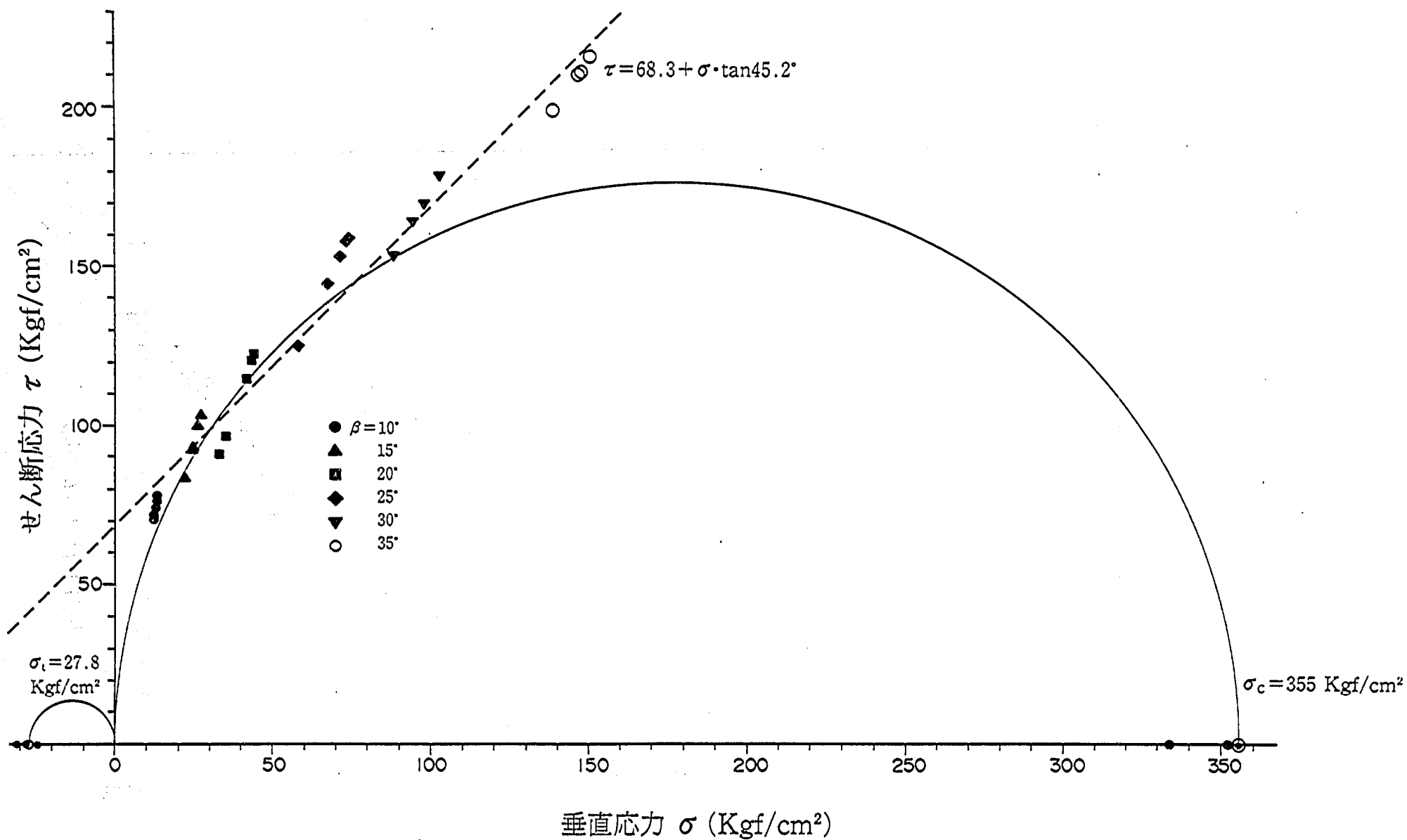


図-10 一般部のせん断強度〔ケースB：角柱・目標材令91日〕

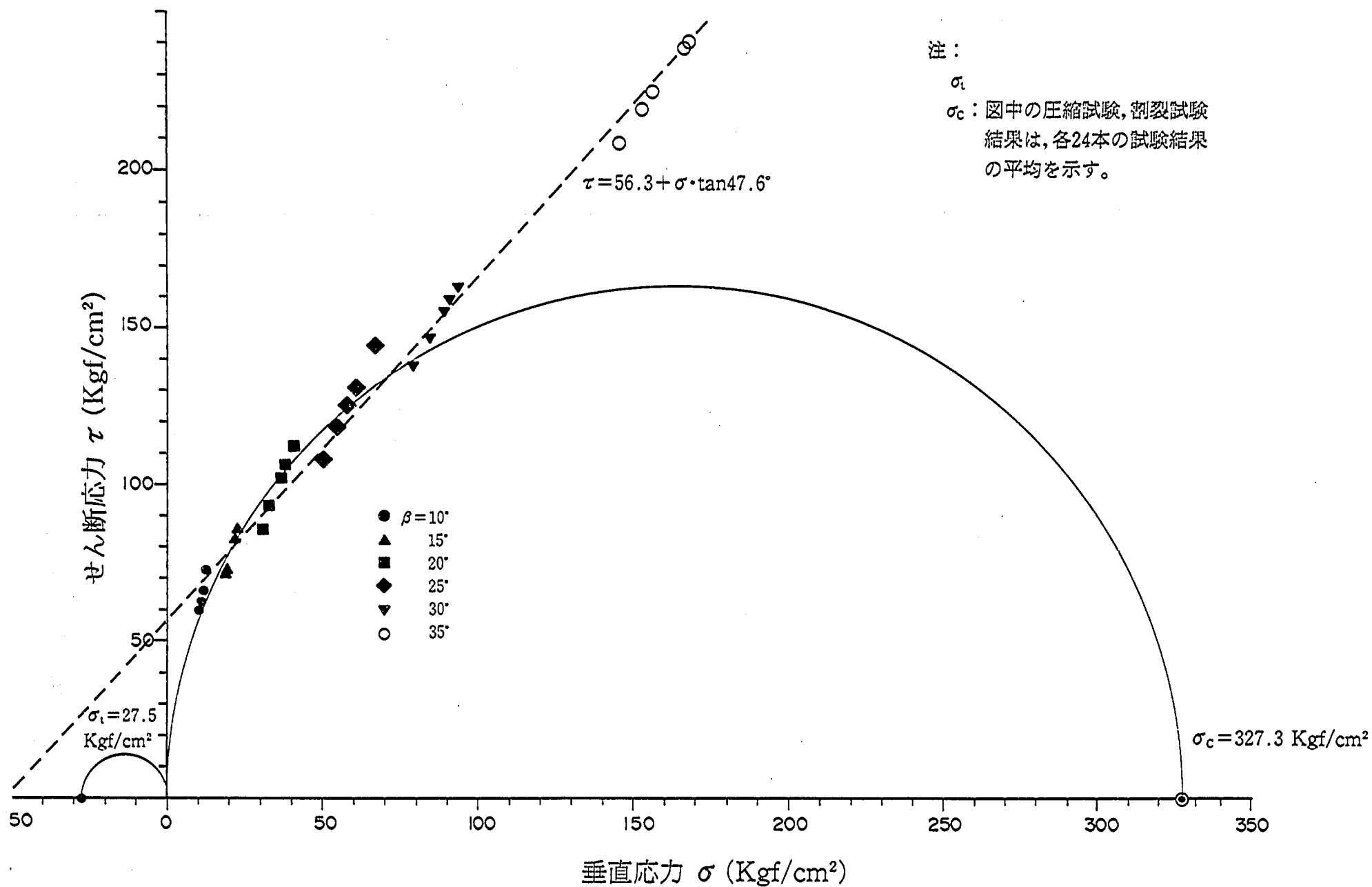


図-11 一般部のせん断強度〔ケースC：円柱・目標材令91日〕

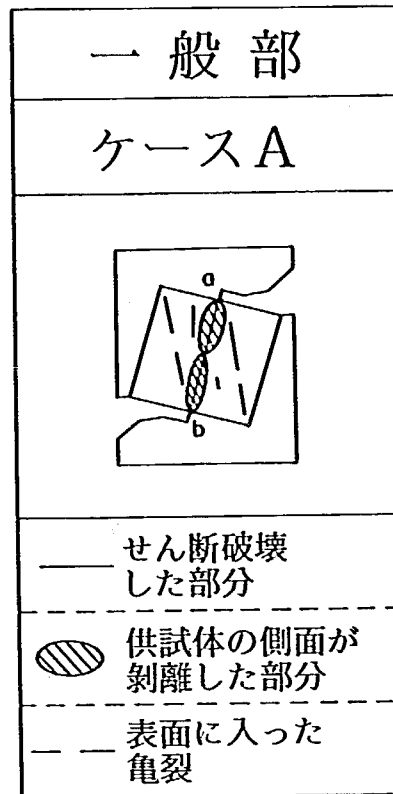


図-12 せん断された供試体の状態

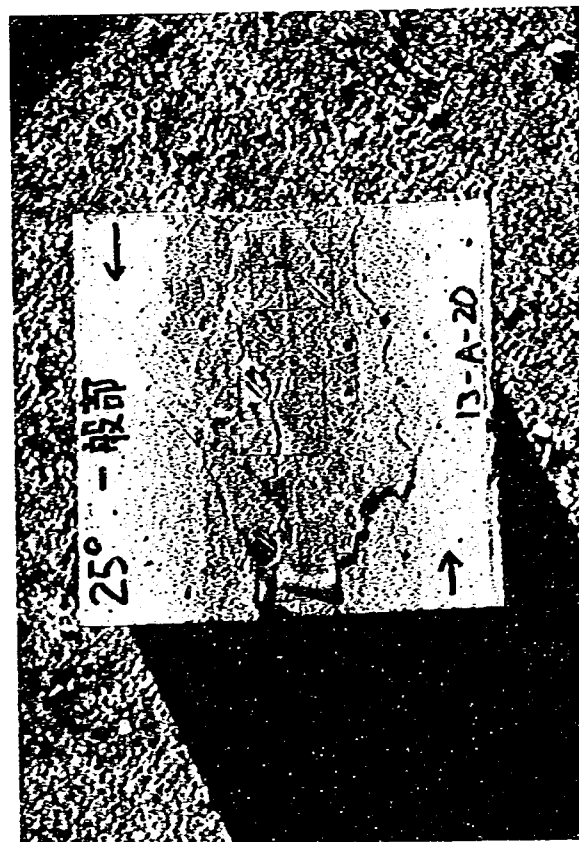


写真-2 せん断された供試体の状態

3.2 一般部と打継目部のせん断強度の比較

図-13に一般部(ケースB)、打継目部(ケースD)およびモルタル(ケースG)供試体に対するせん断試験結果を示す。

なお、打継目部供試体は、打継目に対してワイヤブラシによるグリーンカットと、敷モルタルを施したいわゆる完全処理の供試体である。一般部と打継目部のせん断強度については、せん断角度が 10° 、 15° 、 20° 、 25° では一般部の強度が若干大きく現われ、 30° では打継目部の強度が大きく、せん断角度が 35° ではほとんど同じ大きさとなっている。これらの試験値から最小自乗法で求めた破壊基準線を比較すると、打継目部では一般部に比較してせん断強度 τ_0 が若干小さく、内部摩擦角 ϕ が若干大きいという結果となっている。しかし図-14に示すように、一般部と打継目部のせん断強度の信頼区間(95%)を比較すると、一般部と打継目部の破壊規準線の信頼区間は互いに重なっており、したがって一般部と打継目のせん断強度には有意な差がないといえる。

なお、モルタル供試体のせん断強度は打継目部のせん断強度より大きく現われており、打継目部のせん断強度は敷モルタルの強度ではない事がわかる。

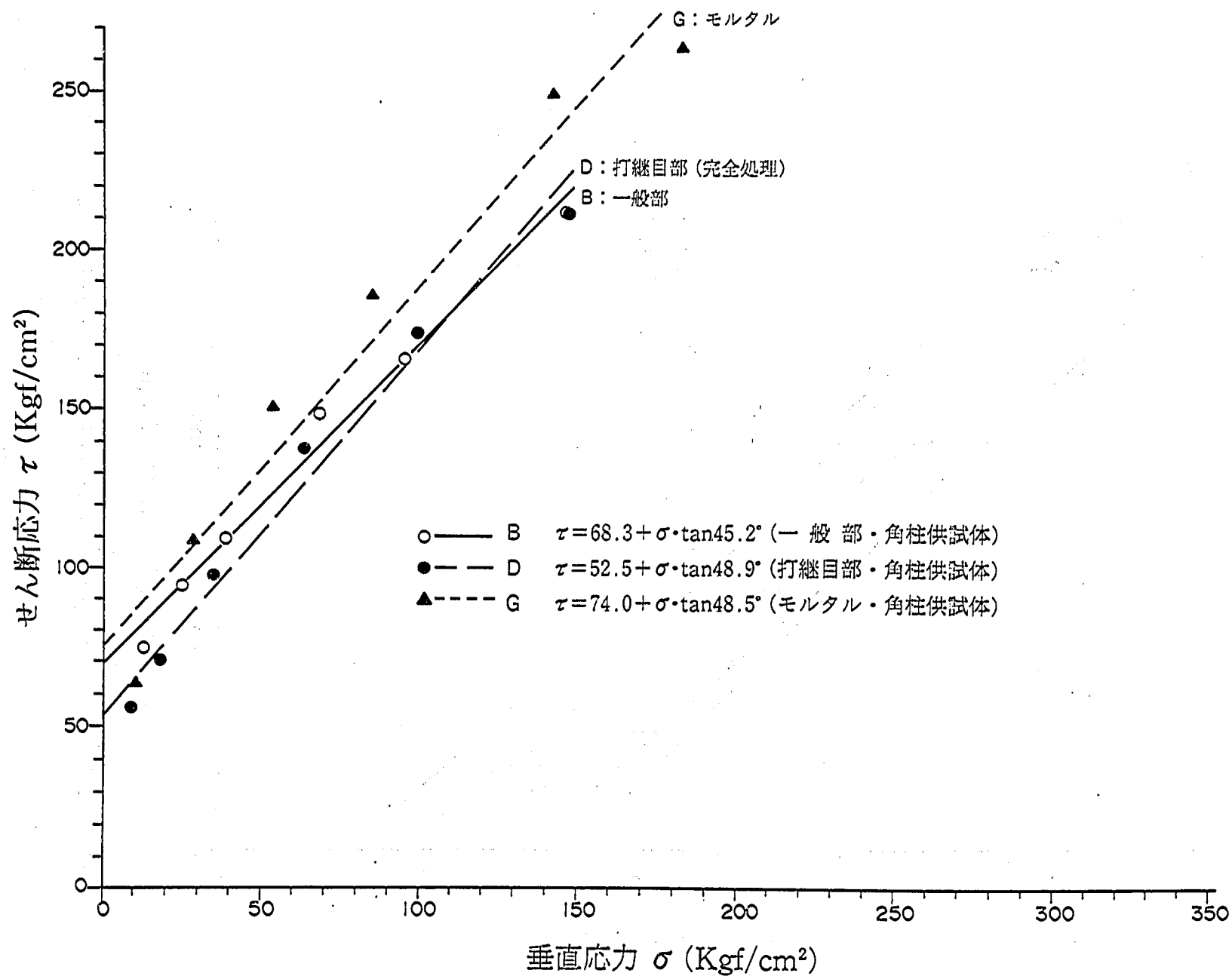


図-13 一般部と打継目部のせん断強度の比較

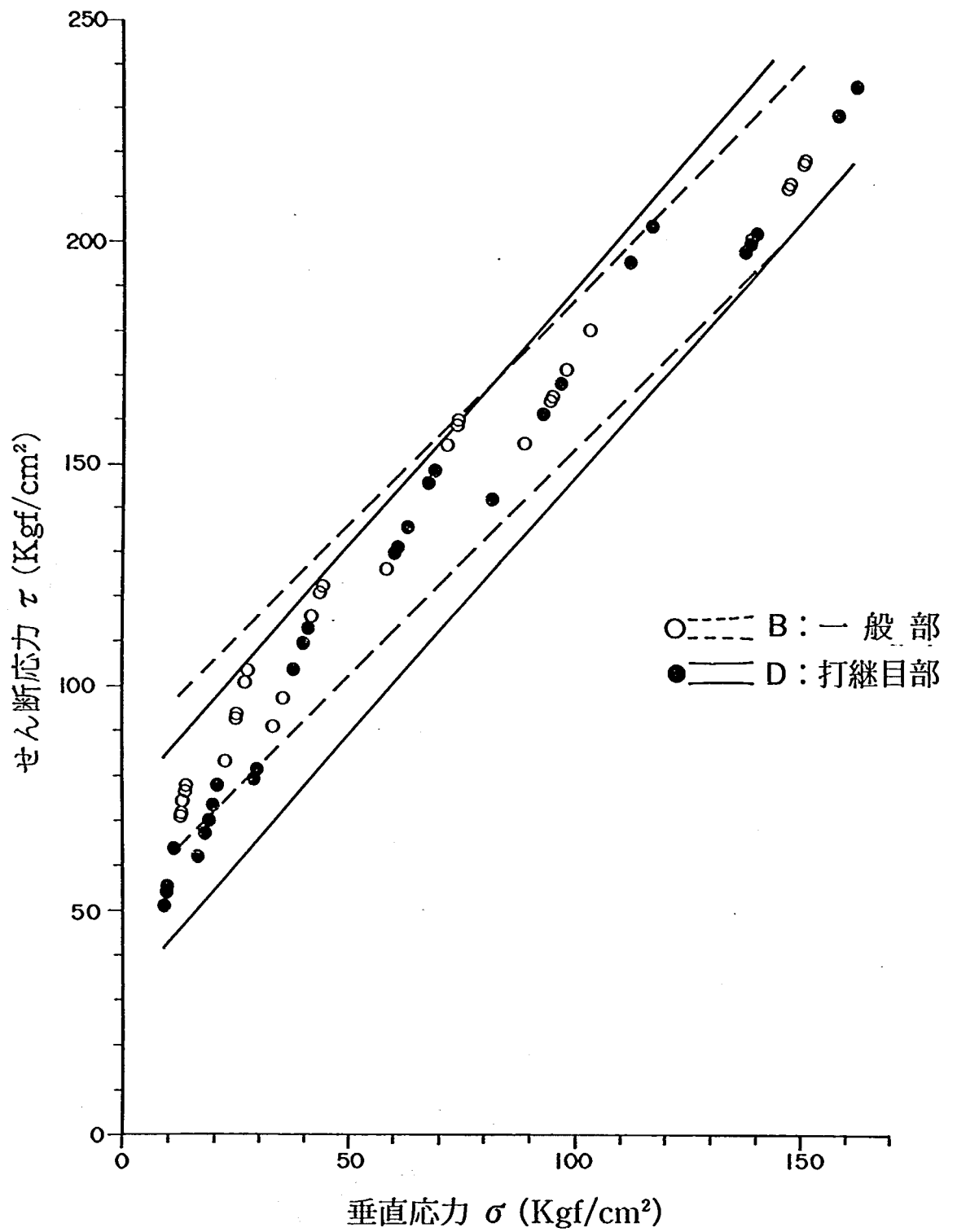


図-14 一般部と打継目部のせん断強度を表わす破壊規準線に対する信頼区間

3.3 打継目の処理方法とせん断強度

打継目の処理方法は、2種類のグリーンカット（ケースD、E）とグリーンカットなし（ケースF）の3ケースについて検討した。ケースDでは、コンクリート打設24時間後にレイトンスをワイヤーブラシにて取り除き（写真-3, 4）、水洗い（表面を洗い流す程度の流水）を行った。また、水洗いを行った後、表面を湿った状態に保っておき、打設48時間後に敷モルタルを厚さ1cmに塗り込み、新コンクリートの打設を行った。ケースEでは、コンクリート打設24時間後に元圧35 kgf/cm²のジェット水を吹き付けてレイトンスを取り除き（写真-5, 6）、水洗いを行った。また、水洗いを行った後表面を湿った状態に保っておき、打設48時間後に敷モルタルを厚さ1cmに塗り込み、新コンクリートの打設を行った。ケースFでは、レイトンスの除去を行わず、打設直前に水洗いを行った後、敷モルタルを厚さ1cmに塗り込み、新コンクリートの打設を行った。

表-4と図-15~17に打継目の処理方法を変えた各ケースのせん断試験結果を示し、図-18には全ケースをまとめた結果を示す。なお、図-18においては、各せん断角度毎に5本の供試体の試験結果を平均した値をプロットしている。

図-15~17をみると、各せん断角度毎の試験値のばらつきの大きさは、グリーンカットを省略した場合に比較してグリーンカットを行った場合の方が若干大きく現われている。これは、打継目を処理することによって粗骨材が表面に現われ、その凹凸の状態によってせん断強度が影響を受けるものと考えられる。

次に、図-18によれば、グリーンカットを行ったケースD、Eとグリーンカットを省略したケースFではせん断強度に明かな強度差がみられ、グリーンカットを省略したケースFのせん断強度は打継目を処理したケースD、Eの半分以下となっている。なお、ジェット水によるグリーンカットを行ったケースEよりも、ワイヤーブラシによるグリーンカットを行ったケースDのせん断強度の方が若干大きくなっているが、実験結果のばらつきを考えると両者には有意な差があるとはいえないといえる。以上の結果から、打継目に対して十分なせん断強度を確保するためには、グリーンカットが不可欠であると言える。

次に、それぞれのケースに対して、せん断された破壊面の状態を図-19に示す。それぞれの特徴を以下に示す。

ケースD：せん断は打継目の敷モルタルより下の旧コンクリート内で生じている。また、ケースAと同様にせん断角度が大きくなると旧コンクリート側の側面に亀裂が多く入る傾向が見られる。（ワイヤーブラシによるグリーンカットを行ったケース）

ケースE：せん断はケースDと同様に打継目の敷モルタルより下の旧コンクリート内で生じている。また、側面の亀裂もケースDと同じように旧コンクリート側に入っている。（ジェット水によるグリーンカットを行ったケース）

ケースF：せん断は旧コンクリートと敷モルタルの境界で生じている。これは、旧コンクリートのレイトンスが旧コンクリートとモルタルの付着を弱めてしまい、モルタルと旧コンクリートの境界が弱面になったためと考えられる。また、側面に入る亀裂もケースD、Eほど著

しくはなく、数も多く入らない。(グリーンカットを省略したケース)

以上の観察結果に見られるように旧コンクリート側のみに亀裂が見られる主な原因としては、旧コンクリートの表面にブリージングによって強度の弱い部分ができ、敷モルタルが新コンクリート側に広がり新コンクリートの強度を増加させたことなどが考えられる。

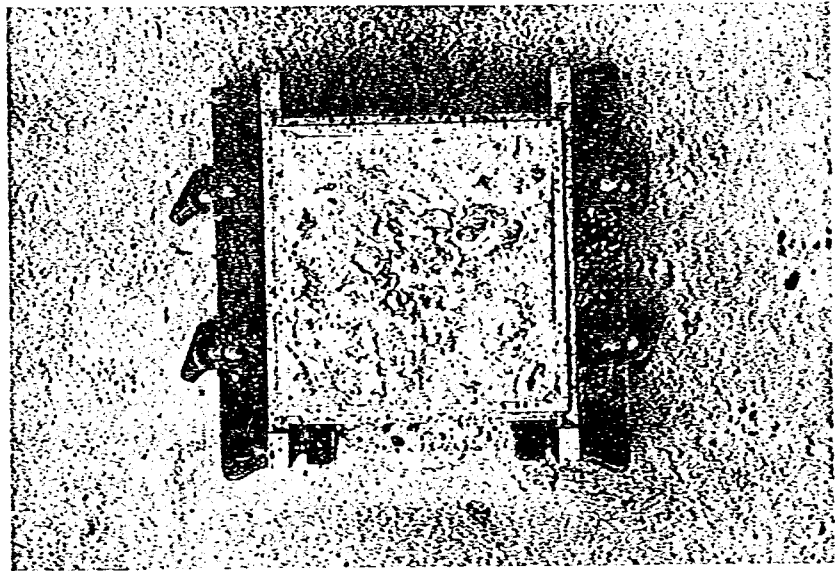


写真-3 グリーンカット前

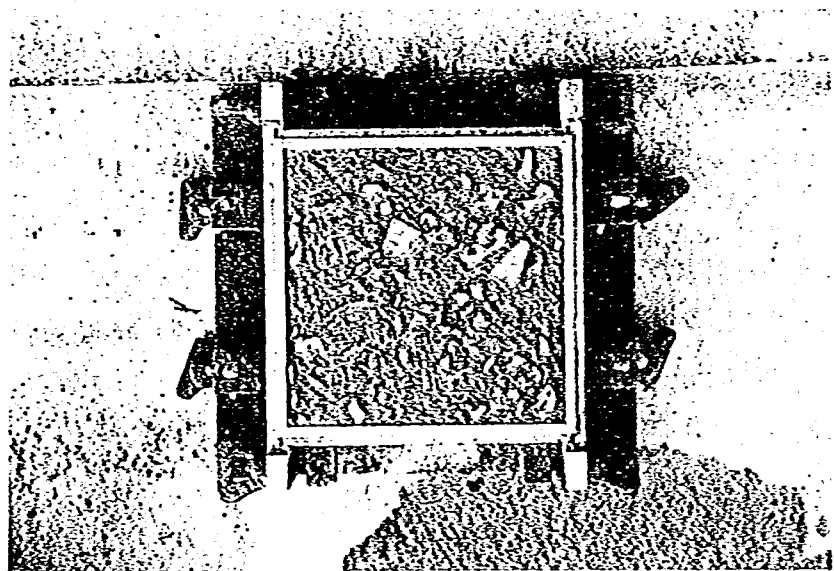


写真-4 ワイヤープラシによるグリーンカット後

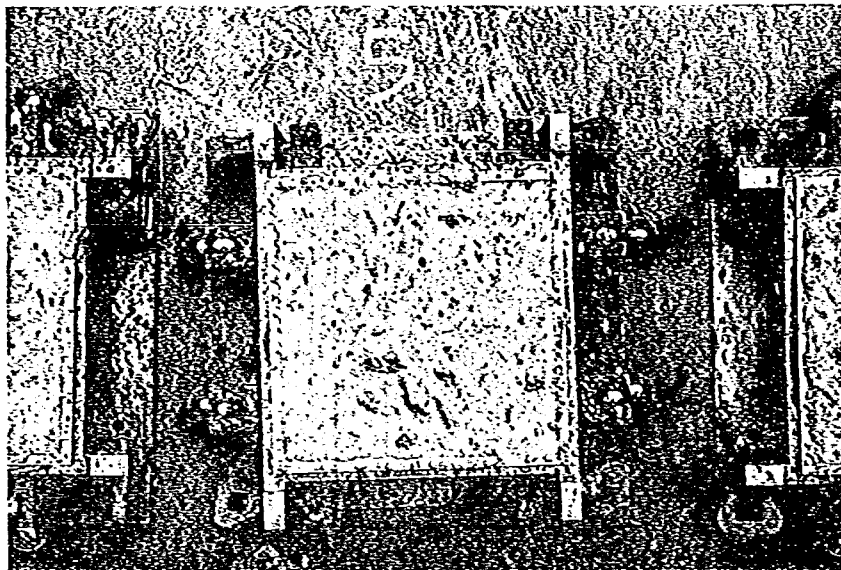


写真-5 グリーンカット前

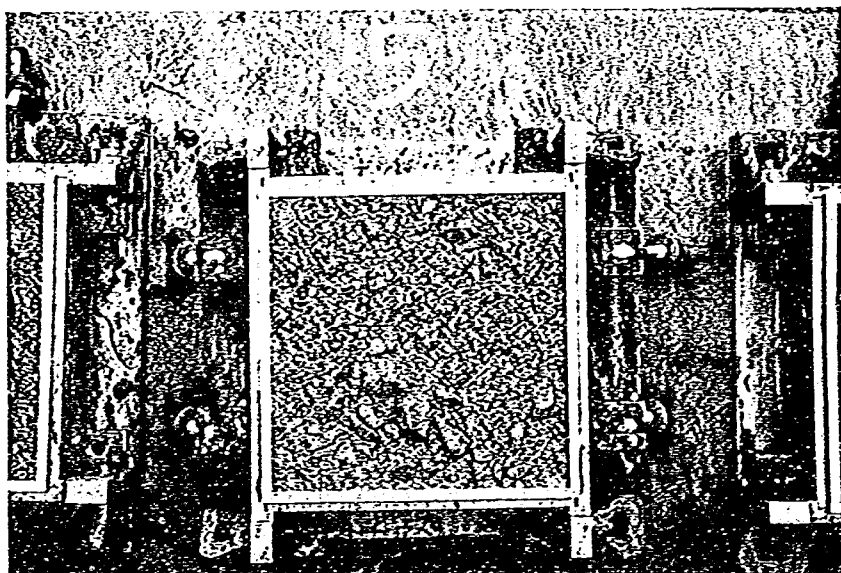


写真-6 ジェット水によるグリーンカット後

表-4 打継目部とモルタルのせん断試験結果〔ケース D~G〕

試 ケ ー ス	目 録 材 令	試 材 令	供 番 試 体 号	$\beta=10^\circ$		15°		20°		25°		30°		35°		せん断強度	
				σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	σ (Kgf/cm ²)	τ (Kgf/cm ²)	τ_0	ϕ
D 完全 処理	91 日	90 } 91 日	1	9.8	55.6	19.8	73.8	39.8	109.4	60.5	129.7	92.9	160.9	138.2	197.3	52.5 Kgf/cm ²	48.9°
			2	9.6	54.3	16.7	62.2	29.6	81.4	63.1	135.3	96.9	167.8	159.1	227.2		
			3	9.6	54.7	20.9	78.1	37.7	103.6	67.8	145.4	117.1	202.8	140.7	220.9		
			4	9.0	51.2	18.8	70.4	28.9	79.4	61.0	130.9	81.8	141.6	139.2	198.8		
			5	11.3	63.9	18.1	67.4	41.0	112.8	69.1	148.2	112.4	194.8	163.4	233.4		
			平均	9.86	55.9	18.86	70.38	35.4	97.3	64.3	137.9	100.22	173.6	148.1	211.5		
E ジェット水 散モルタル	91 日	95 } 108 日	1	9.3	53.0	18.52	69.1	35.3	96.9	57.3	122.9	81.8	141.6	152.4	217.7	51.6 Kgf/cm ²	47.1°
			2	8.2	46.4	20.1	75.1	36.2	99.4	46.0	98.7	83.6	144.7	127.9	182.8		
			3	10.7	60.8	20.2	75.6	37.2	102.3	53.7	115.2	84.9	147.0	115.9	165.7		
			4	7.9	45.1	15.6	58.4	36.3	99.8	59.0	126.5	84.0	145.5	116.2	166.0		
			5	10.3	58.2	19.9	74.3	33.6	92.3	52.2	112.0	78.9	136.6	125.2	178.8		
			平均	9.29	52.7	18.86	70.5	35.7	98.1	53.6	115.1	82.6	143.1	127.5	182.2		
F 無 処 理 散モルタル	91 日	116 } 123 日	1	5.02	28.5	6.59	24.5	11.55	31.74	25.2	54.0	32.0	55.4	66.3	94.7	19.5 Kgf/cm ²	50.3°
			2	3.5	19.7	9.89	36.92	11.24	30.91	22.3	48.3	46.7	80.8	87.3	124.9		
			3	5.02	28.5	6.9	25.76	12.0	32.99	28.4	60.8	47.1	81.6	71.9	102.7		
			4	3.2	17.9	6.33	23.61	18.54	50.95	24.0	51.6	40.9	70.8	76.7	109.6		
			5	4.01	22.8	5.75	21.5	10.79	29.65	19.0	40.7	37.8	65.4	71.1	101.6		
			平均	4.1	23.5	7.09	26.46	12.82	35.25	23.8	51.1	40.9	70.8	74.7	106.7		
G 散モルタル	91 日	97 } 133 日	1	10.42	59.1	27.8	103.9	58.8	161.6	88.1	188.9	139.6	241.7	184.1	262.9	74.0 Kgf/cm ²	48.5°
			2	11.0	62.2	29.3	109.5	54.9	150.8	82.5	176.8	148.0	256.3	184.8	263.9		
			3	11.42	64.78	31.3	116.8	55.0	151.2	86.8	186.1	144.9	250.9	178.4	254.8		
			4	11.81	67.0	29.4	109.9	53.5	147.0	90.2	193.3	143.6	248.6	190.9	272.7		
			5	11.81	67.0	27.5	102.6	52.0	142.8	85.7	183.7	142.7	247.1	183.5	262.1		
			平均	11.3	64.0	29.06	108.5	54.8	150.7	86.6	185.7	143.8	248.9	184.3	263.3		

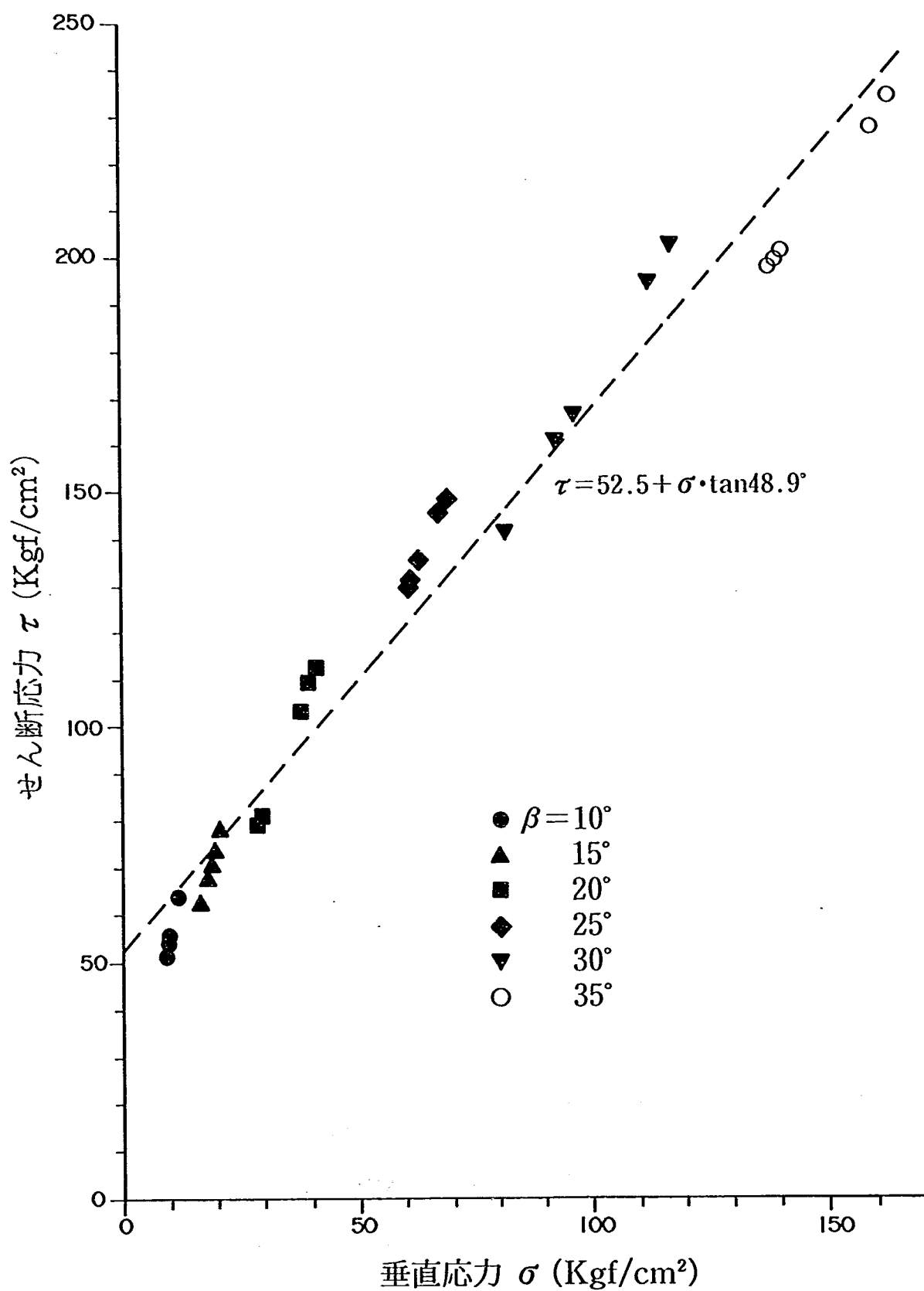


図-15 打継目部のせん断強度 (ケースD: ワイヤブラシによる処理・敷モルタル)

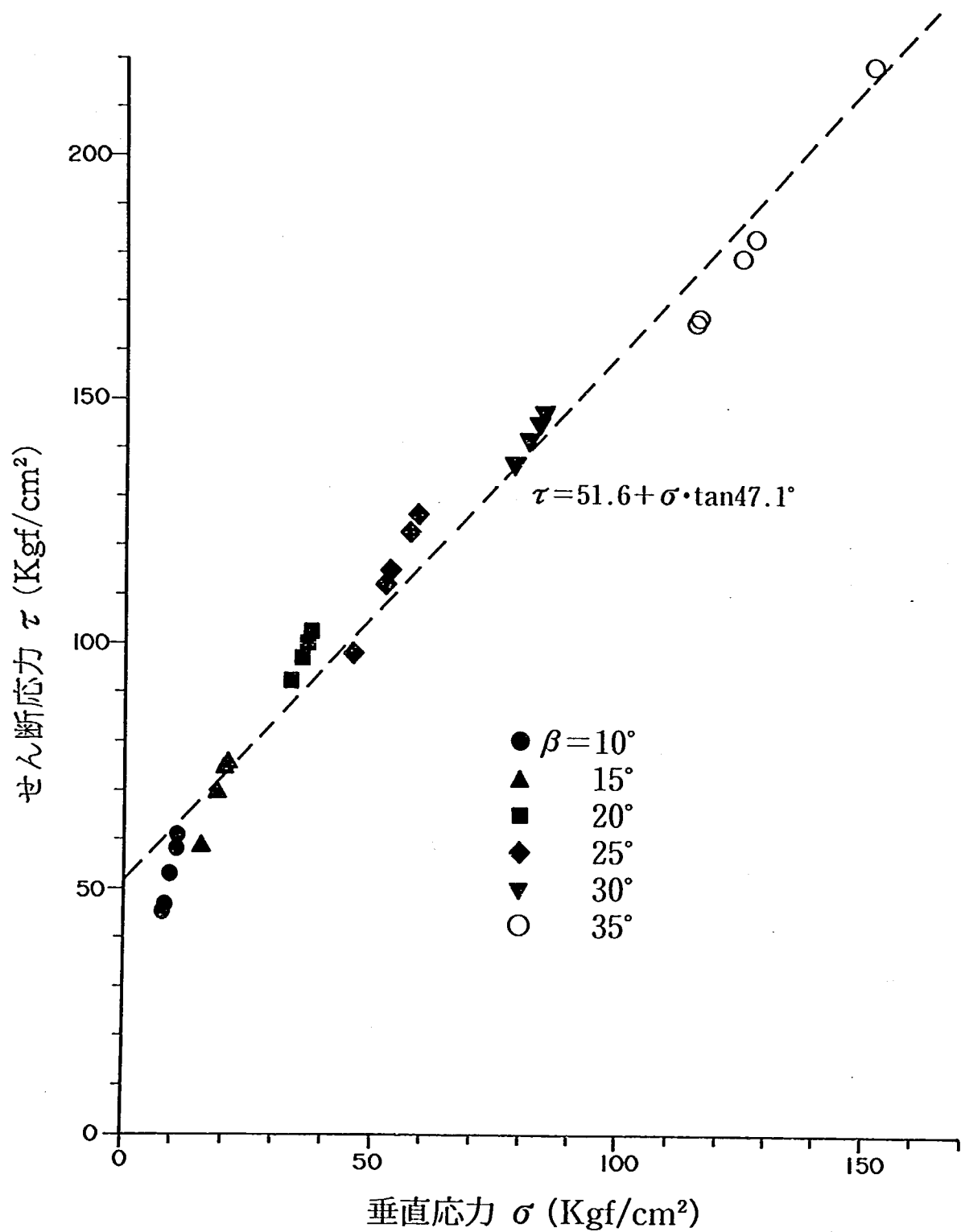


図-16 打継目部のせん断強度 (ケースE: ジェット水による処理・敷モルタル)

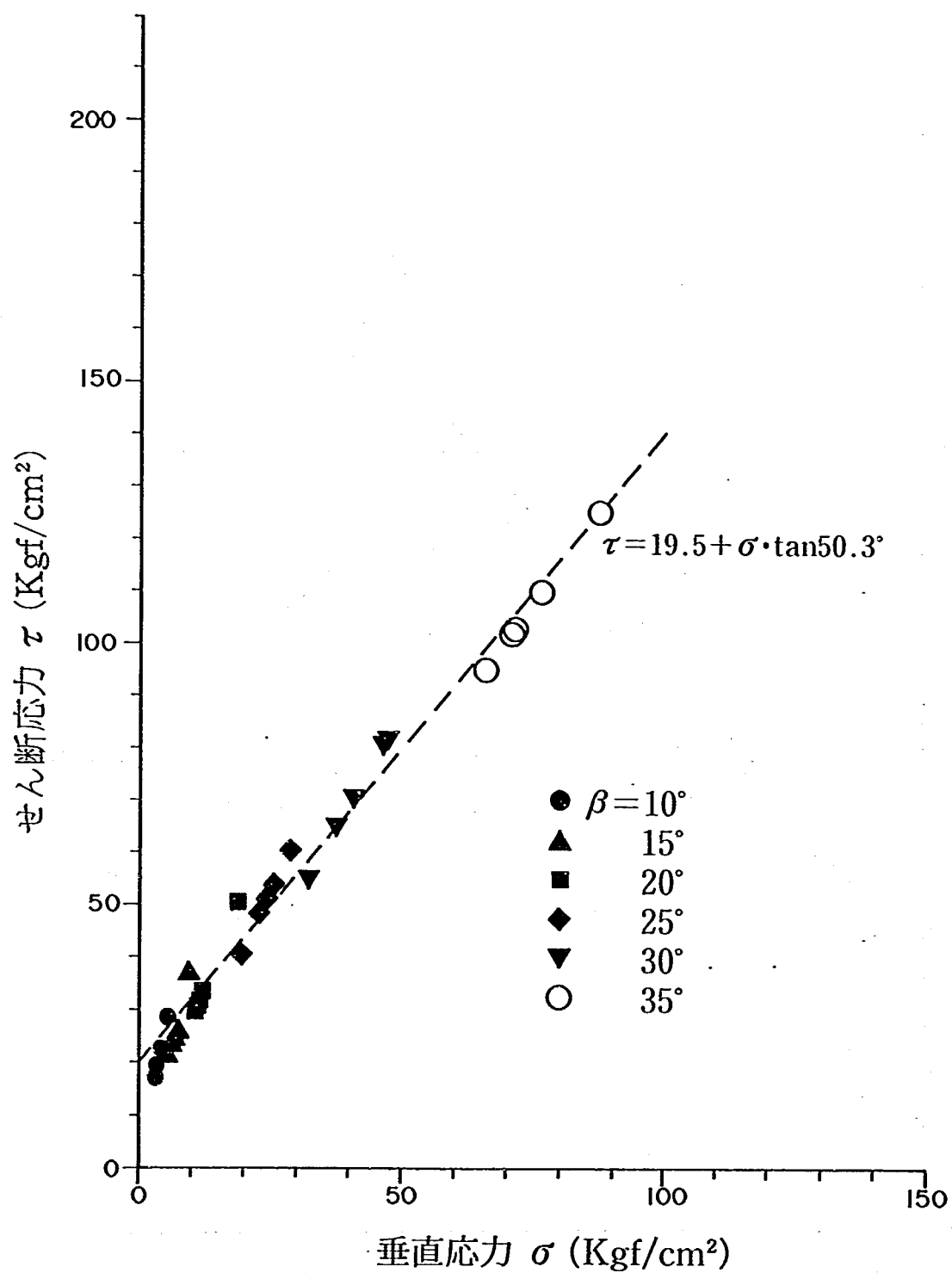


図-17 打継目部のせん断強度 (ケース F: 無処理・敷モルタル)

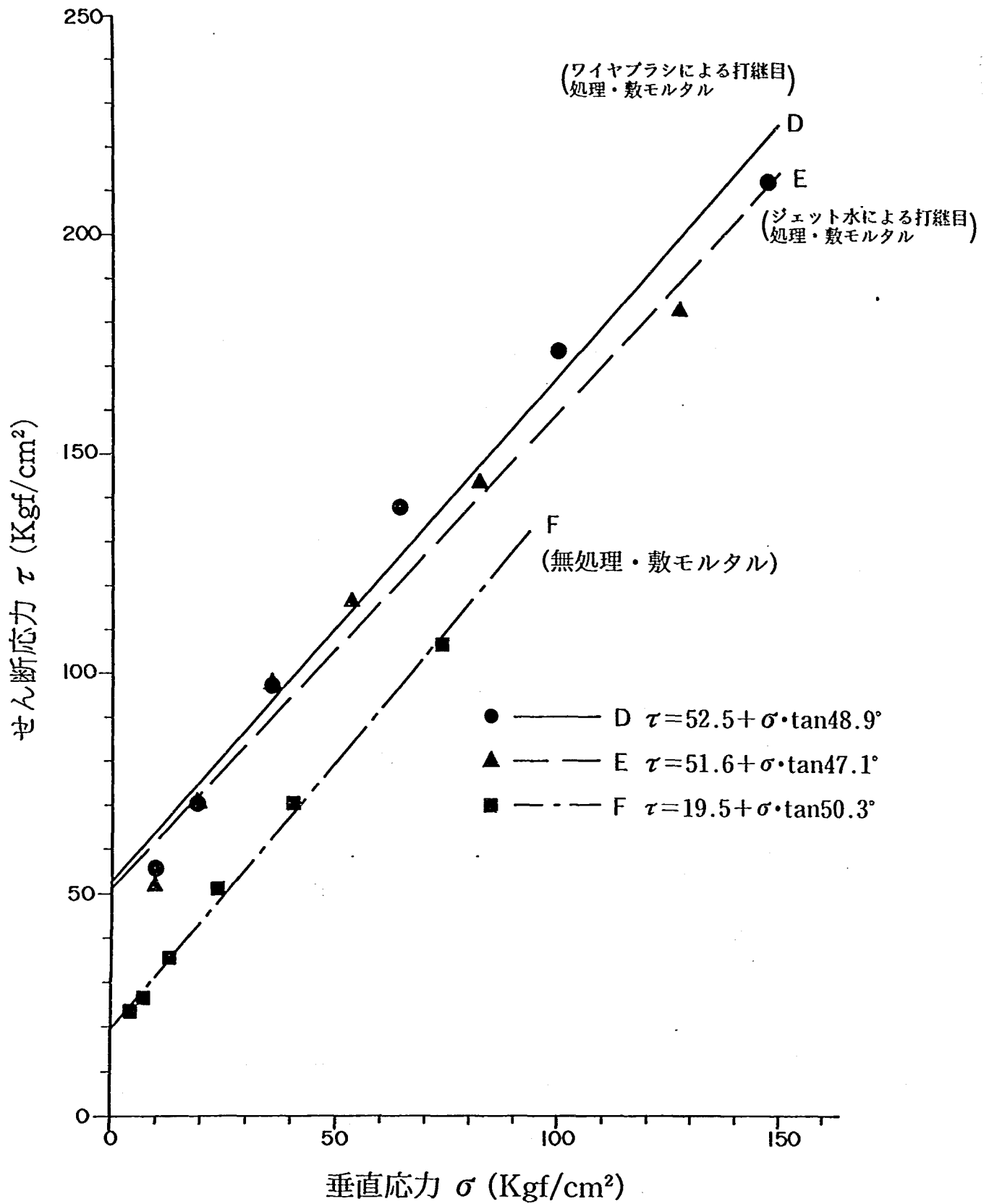


図-18 打継目部の処理方法とせん断強度

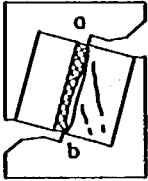
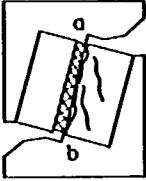
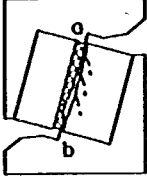
打 継 目 部		
ケースD (ワイヤーブラシ)	ケースE (ジェット水)	ケースF (無処理)
		
—— せん断破壊 した部分	—— せん断破壊 した部分	—— せん断破壊 した部分
▨▨▨▨ モルタル部分	▨▨▨▨ モルタル部分	▨▨▨▨ モルタル部分
— — 表面に入った 亀裂	— — 表面に入った 亀裂	— — 表面に入った 亀裂

図-19 せん断された供試体の状態

3.4 セン断時のひずみ測定

今回の実験では、せん断試験時の供試体の挙動を詳細に測定する目的を持って、供試体の側面にひずみゲージを貼付け、ひずみの測定を実施した。その結果、ひずみの測定値は供試体毎にばらつきが大きく、必ずしも良好なデータは得られなかった。これは、ひずみゲージの寸法が 20 mm と短かったことから、コンクリート中の骨材等の局所的な影響がとらえられてしまったためでないかと思われる。したがって、ひずみの測定方法については今後改善の余地があるものと考えられるが、ここではとりあえずその結果についてのべるものとする。

1) ひずみ変化

図-20 (a)～(f)に、供試体側面で計測したひずみの中から、各せん断角度毎に代表的な供試体の端部 (A と C) と中央部 (B) のひずみの履歴を示す。これらの図の中で V はせん断面に対して直交方向のひずみ、D は V に対して斜め 45° 方向のひずみ、H は供試体のせん断方向のひずみを表している。

せん断角度が小さい場合、せん断面に直交方向のひずみ V は载荷の初期段階から引張ひずみとなる傾向が見られ、この場合、破壊まで引張ひずみが増加している。また、斜め方向ひずみ D、せん断方向ひずみ H は、载荷の初期段階から圧縮ひずみであり、破壊まで圧縮ひずみが増加している。ただし、斜め方向ひずみ D については破壊の前にひずみが引張側に变化しているデータもあるが、これは载荷によって局所的に破壊が生じ、応力の乱れが生じたためと考えられる。なお、最大载荷の約 60% 以内では、载荷重に対して各ひずみはほぼ直線的に変化しており、試験時の荷重伝達状態は安定しているものと判断できる。

2) 応力変化

図-21 (a)～(f)に、図-20 に示した各供試体のひずみから算出した第 1 主応力と第 2 主応力の履歴を示す。なお、この際用いた弾性係数とポアソン比の値は、一軸圧縮試験時のひずみ測定値 (圧縮強度の 60% の応力に対するひずみ) から求めた。図より、第 1 主応力は圧縮側に变化し、第 2 主応力は引張側に变化している。

次に、図-22 に、せん断試験を FEM 解析によって模擬して求めた主応力図と、ひずみゲージより求めた主応力図を比較して示す。作図した荷重レベルは、発生ひずみから判断して弾性領域内での最大値を選んだものであり、FEM 解析値は実験値と同じ荷重レベルで計算したものである。

これらの図から判断すると実測値の応力の大きさは、計算値の応力の大きさに比べ、大きい場合または小さい場合があり比較できないが、主応力の作用角度は両方で良く一致しており、試験時の荷重の伝達状態は良好であったということが出来る。

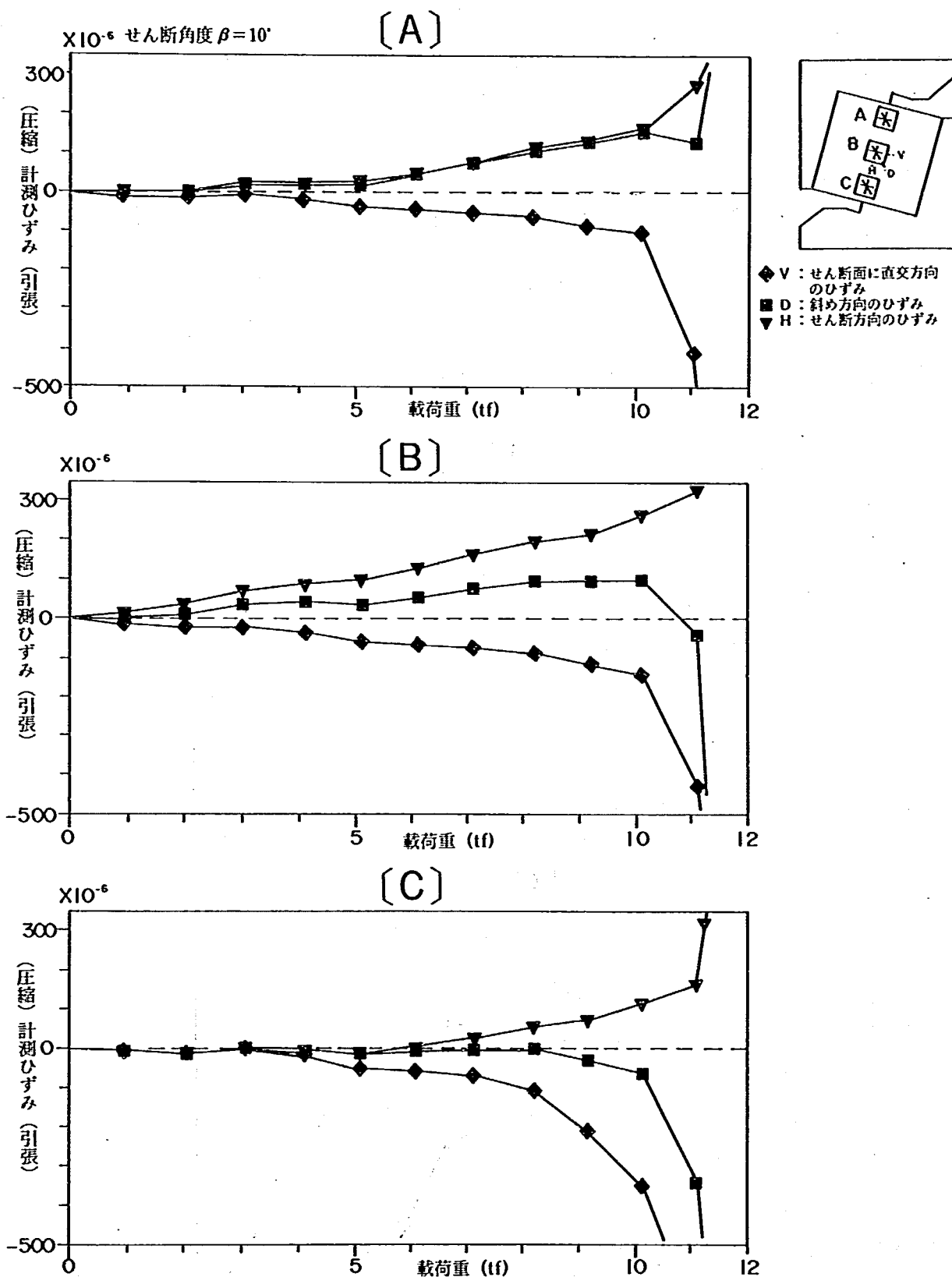


図-20 (a)せん断時のひずみ履歴 ($\beta = 10^\circ$)

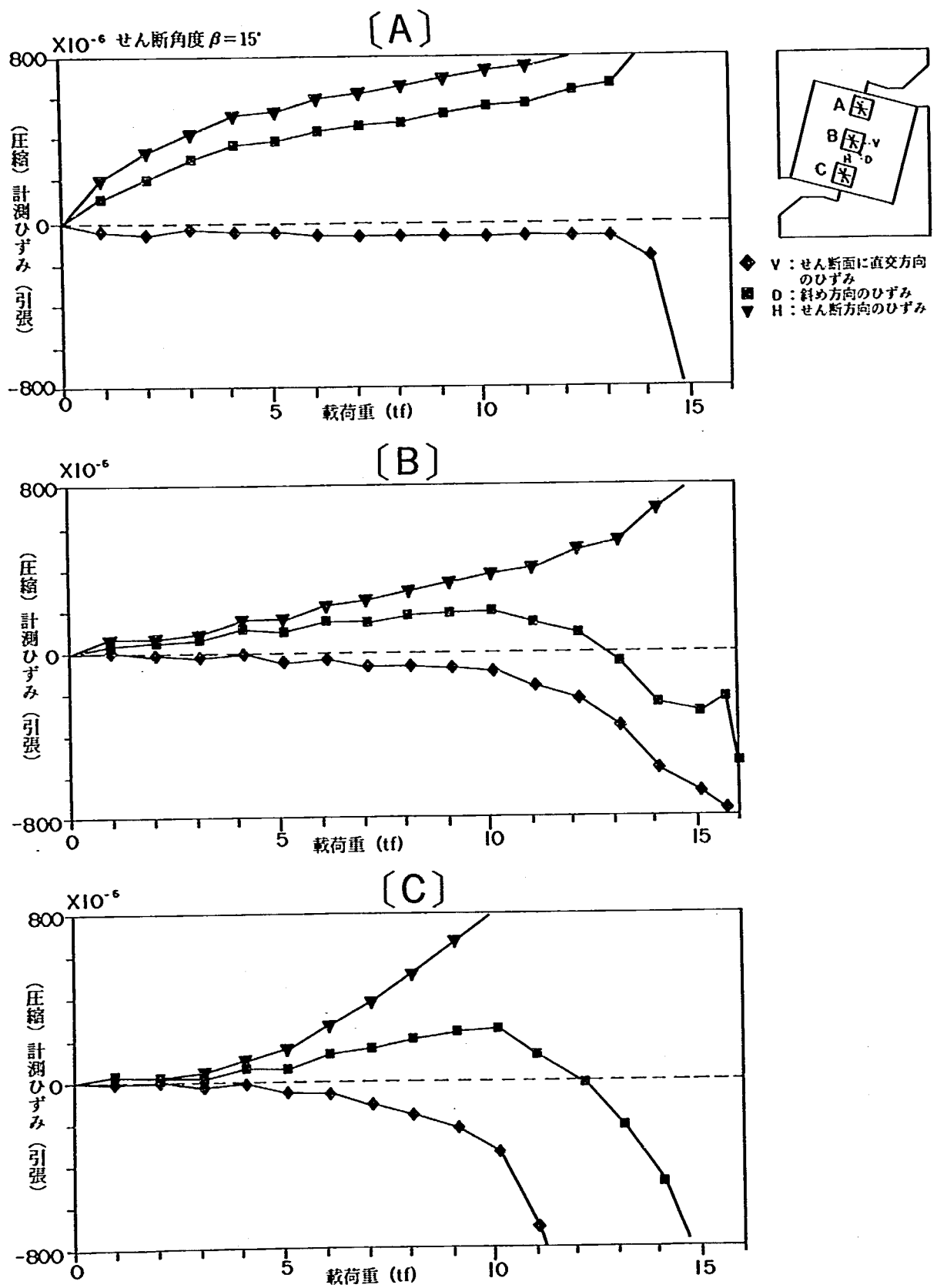


図-20 (b)せん断時のひずみ履歴 ($\beta = 15^\circ$)

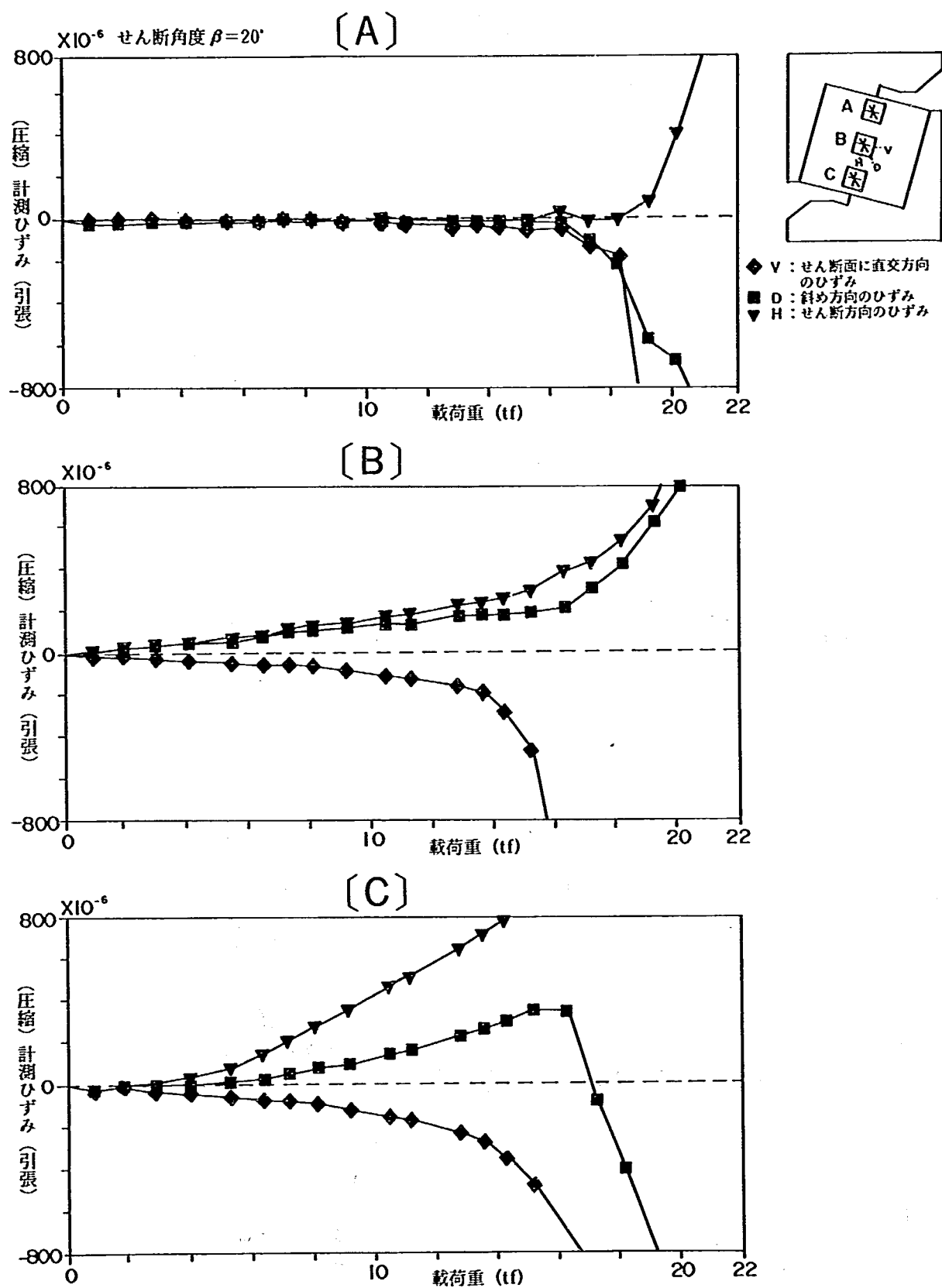


図-20 (c)せん断時のひずみ履歴 ($\beta = 20^\circ$)

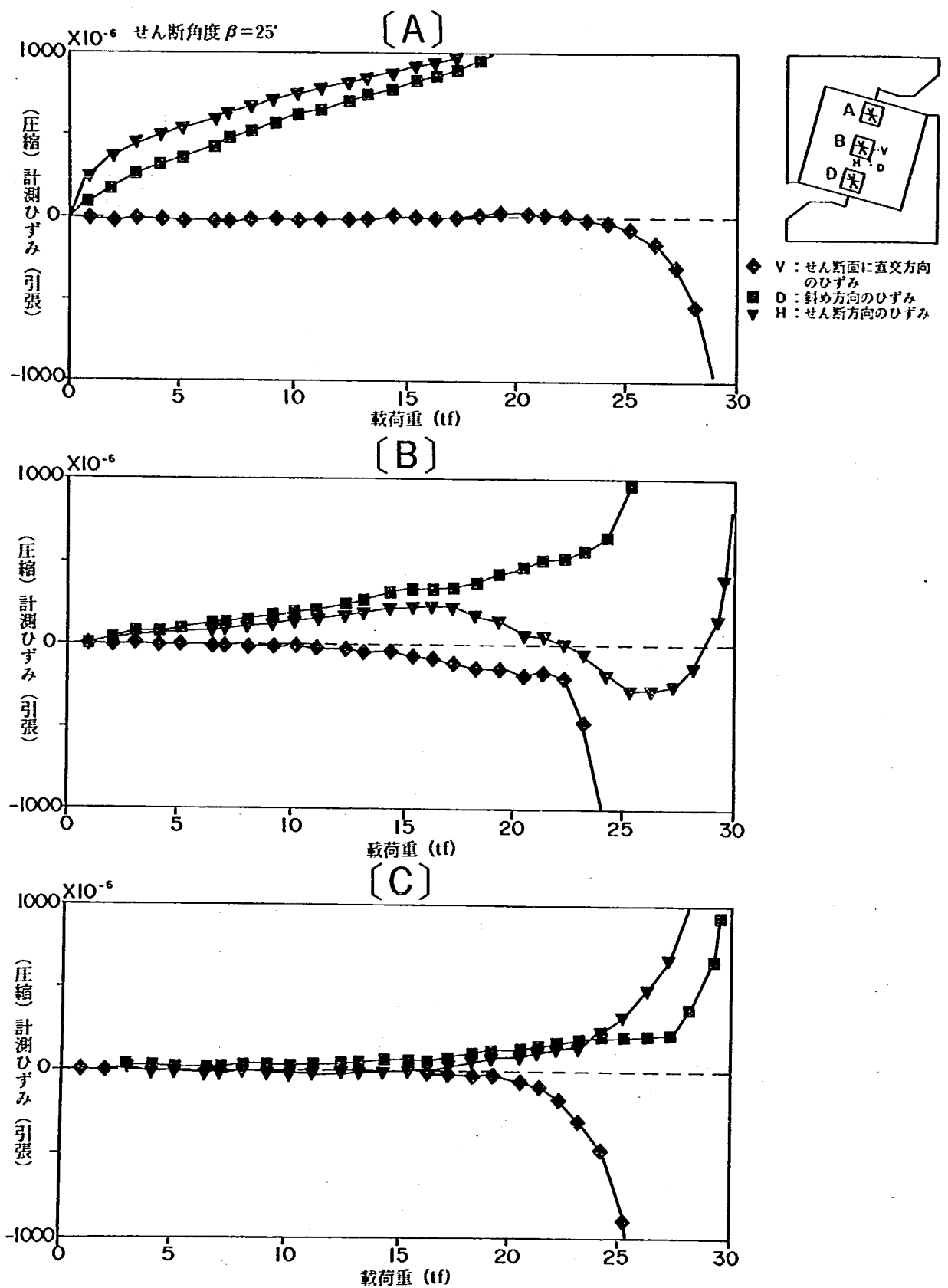


図-20 (d)せん断時のひずみ履歴 ($\beta = 25^\circ$)

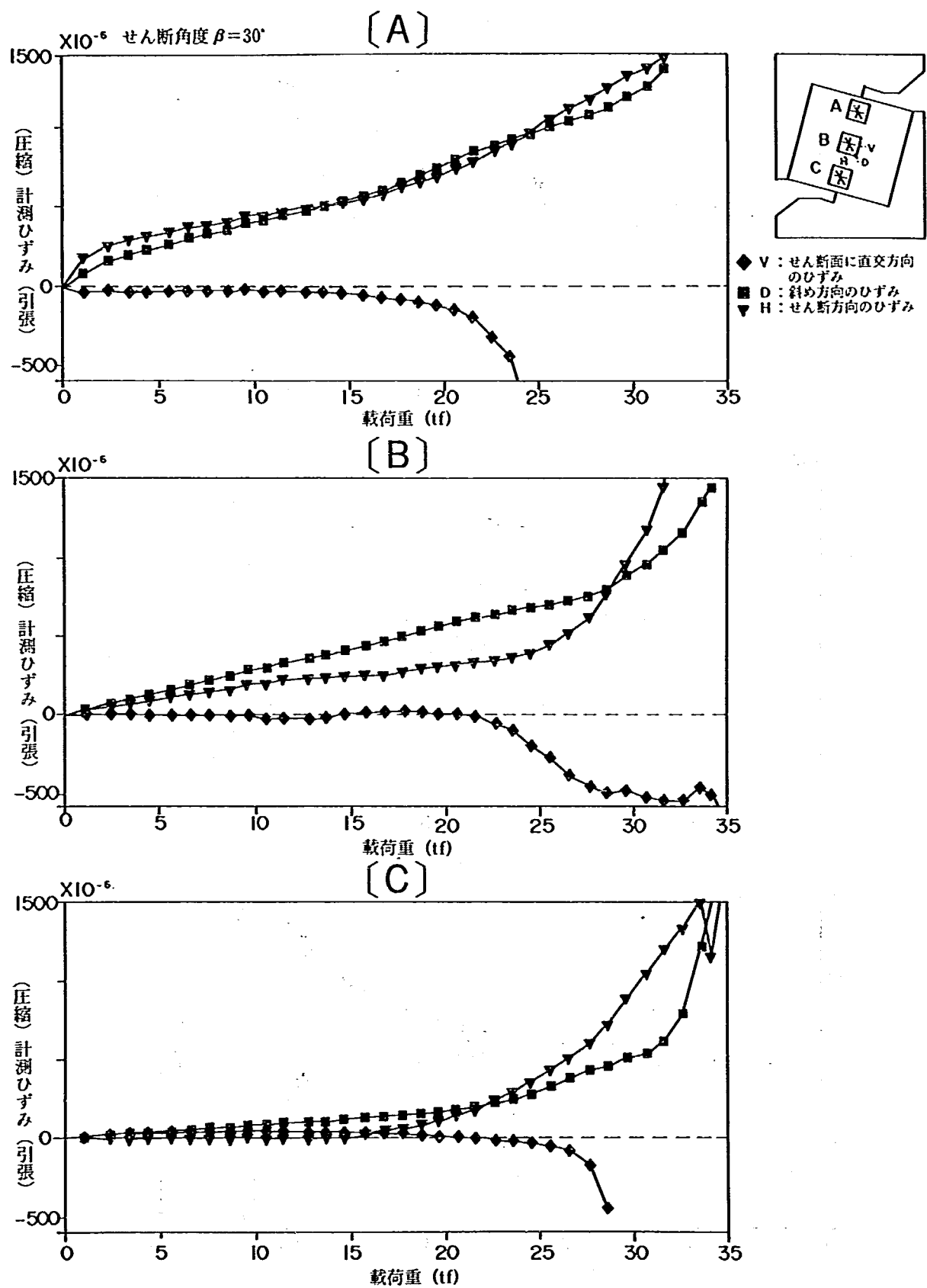


図-20 (e)せん断時のひずみ履歴 ($\beta = 30^\circ$)

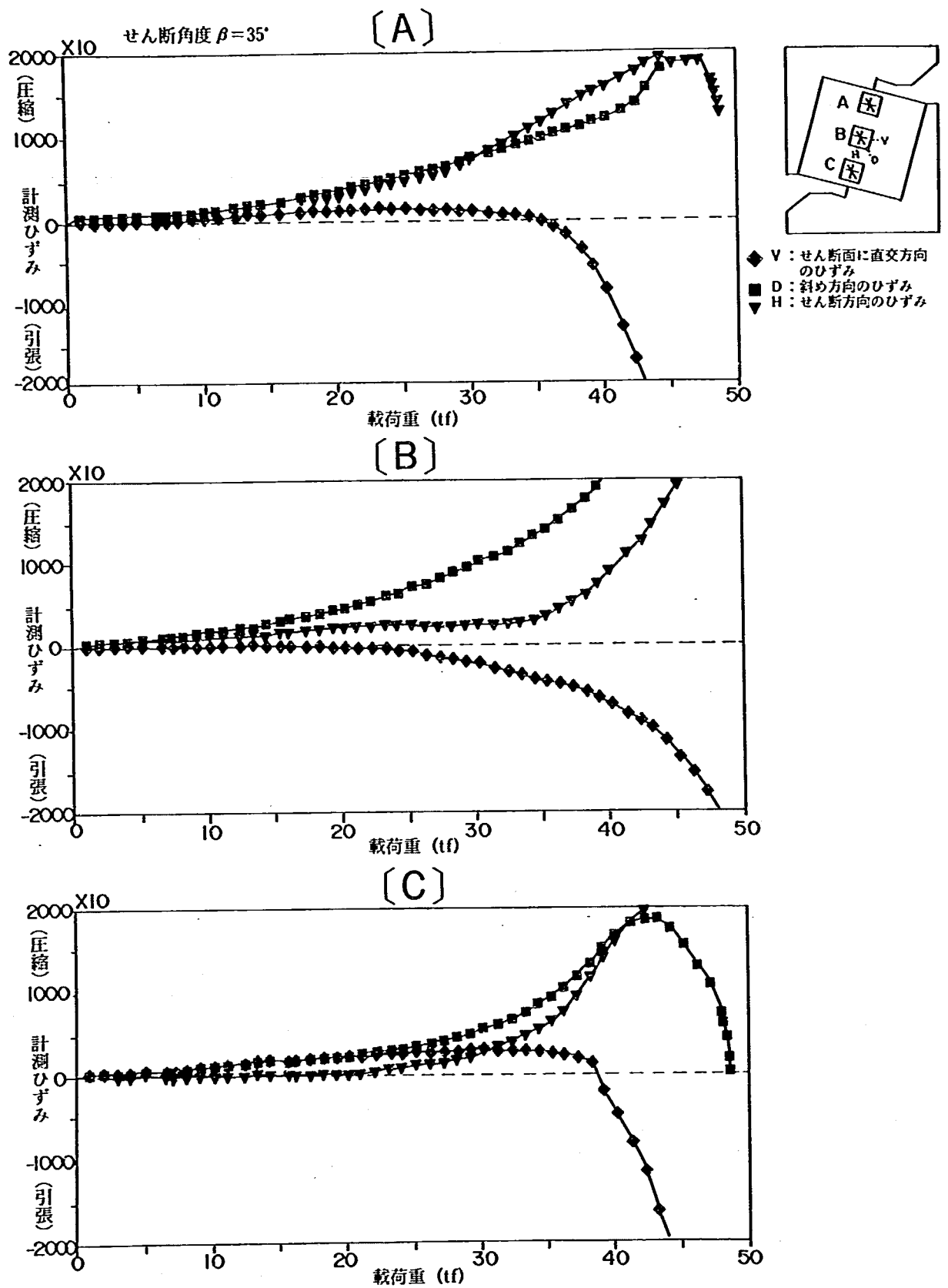


図-20 (f)せん断時のひずみ履歴 ($\beta = 35^\circ$)

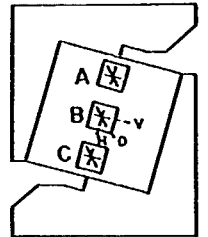
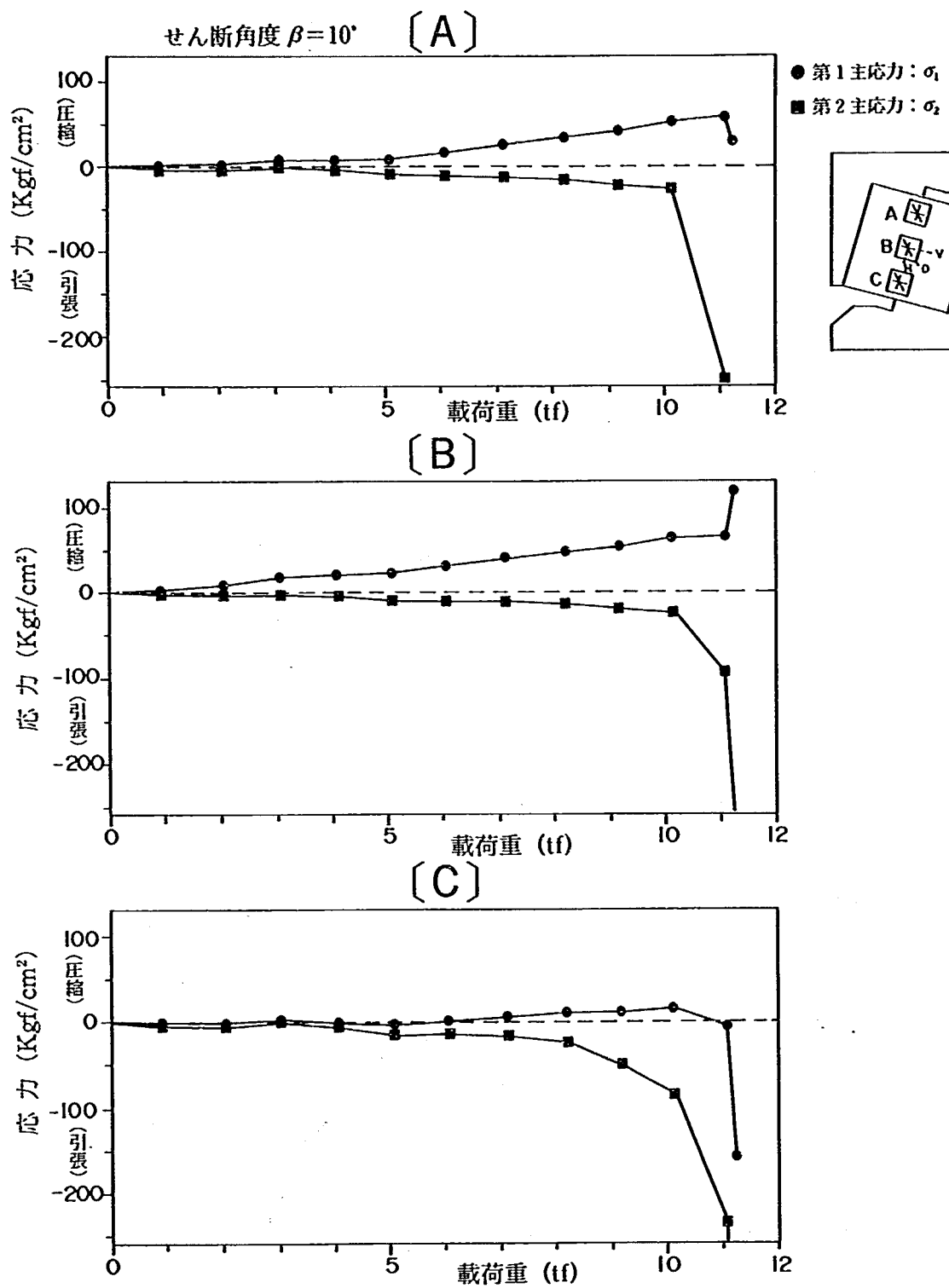


図-21 (a)実測ひずみから算出した主応力の履歴

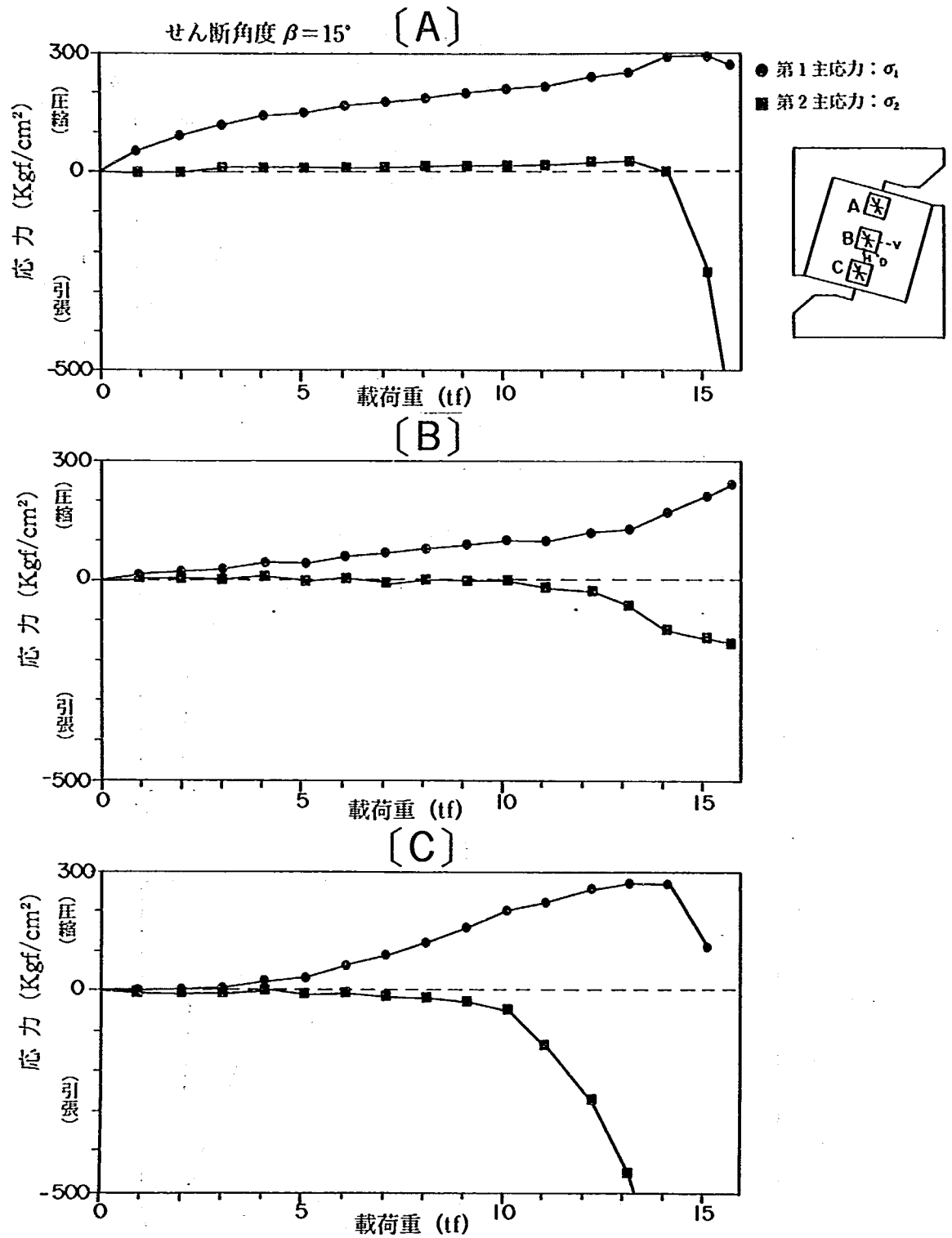


図-21 (b)実測ひずみから算出した主応力の履歴

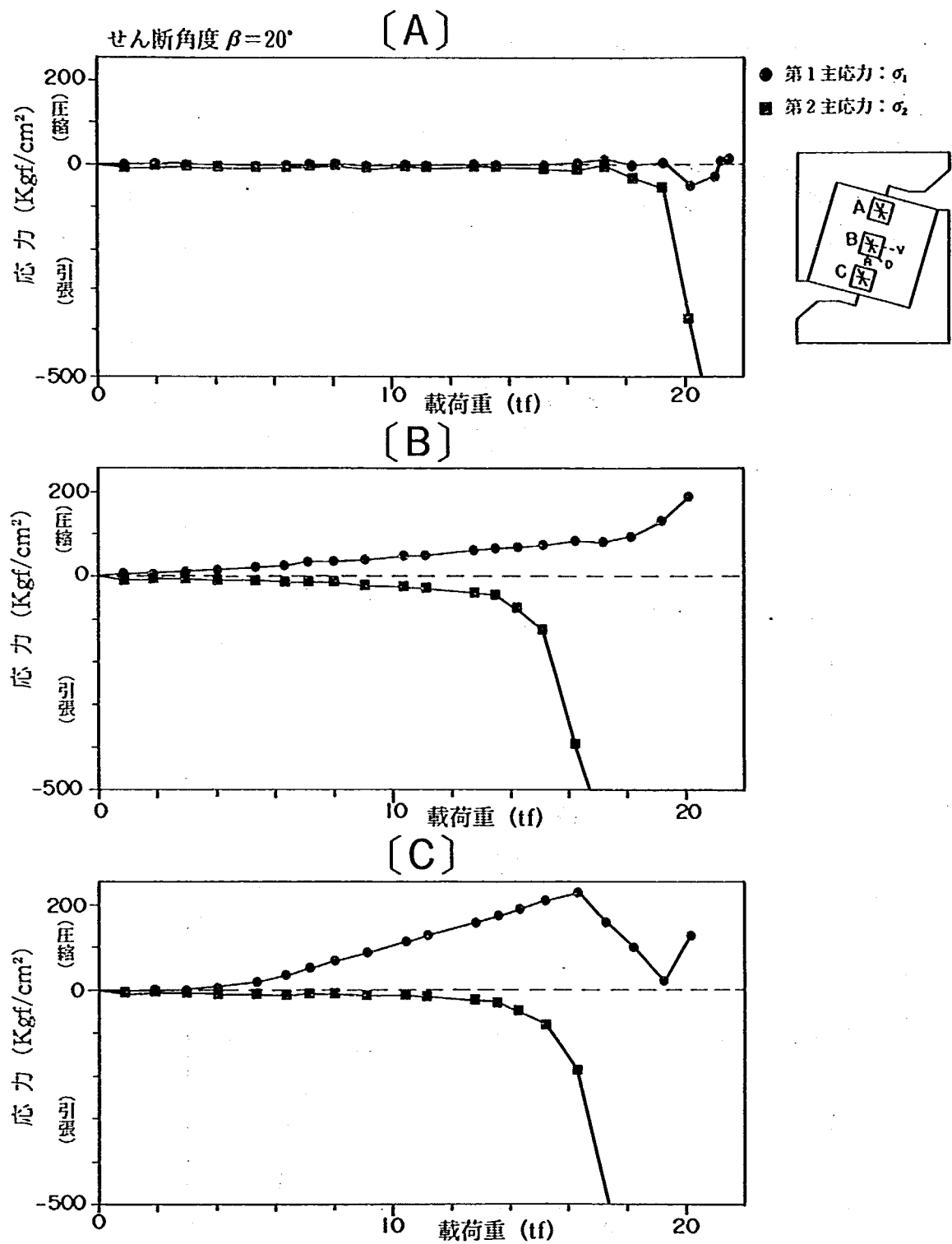


図-21 (c)実測ひずみから算出した主応力の履歴

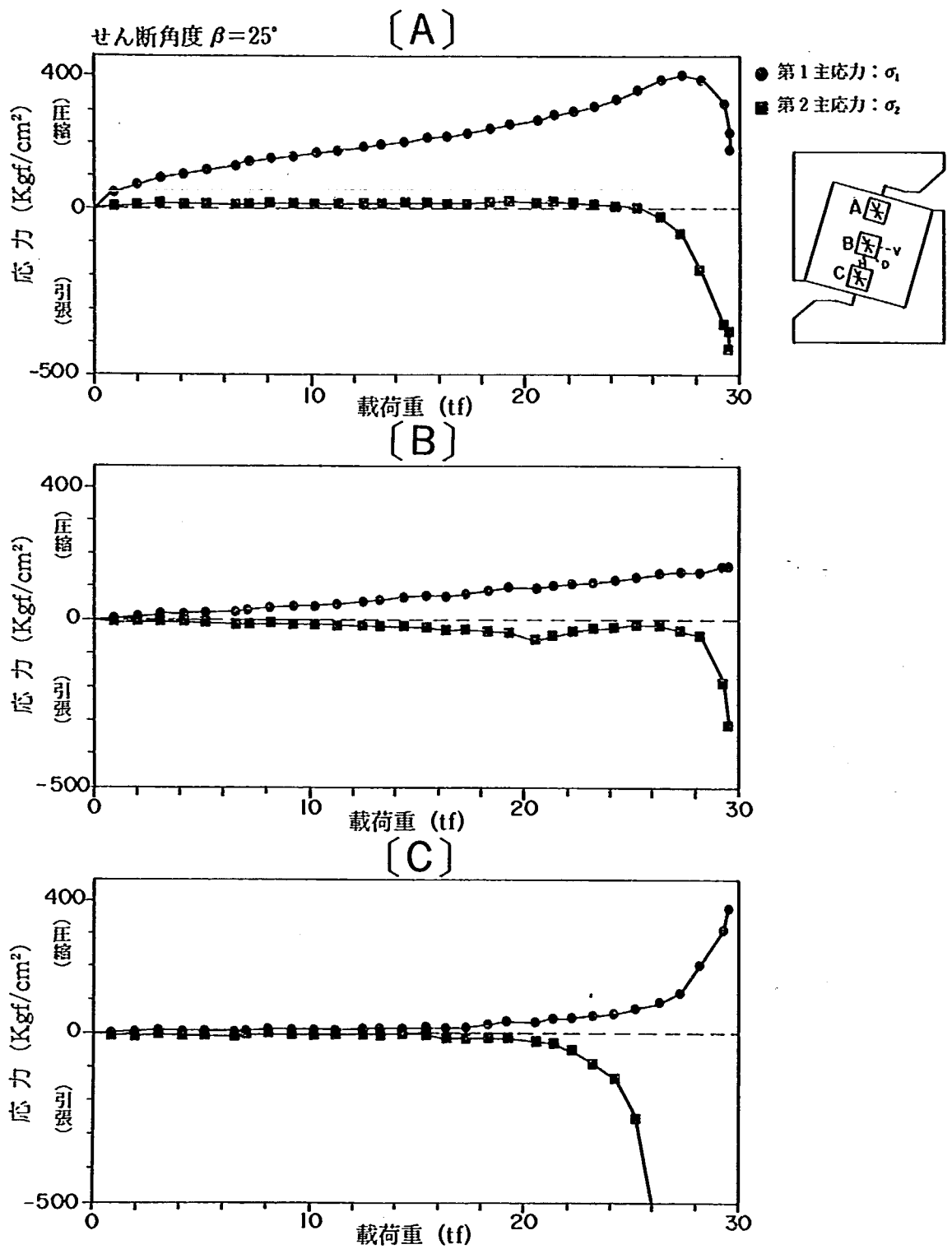


図-21 (d)実測ひずみから算出した主応力の履歴

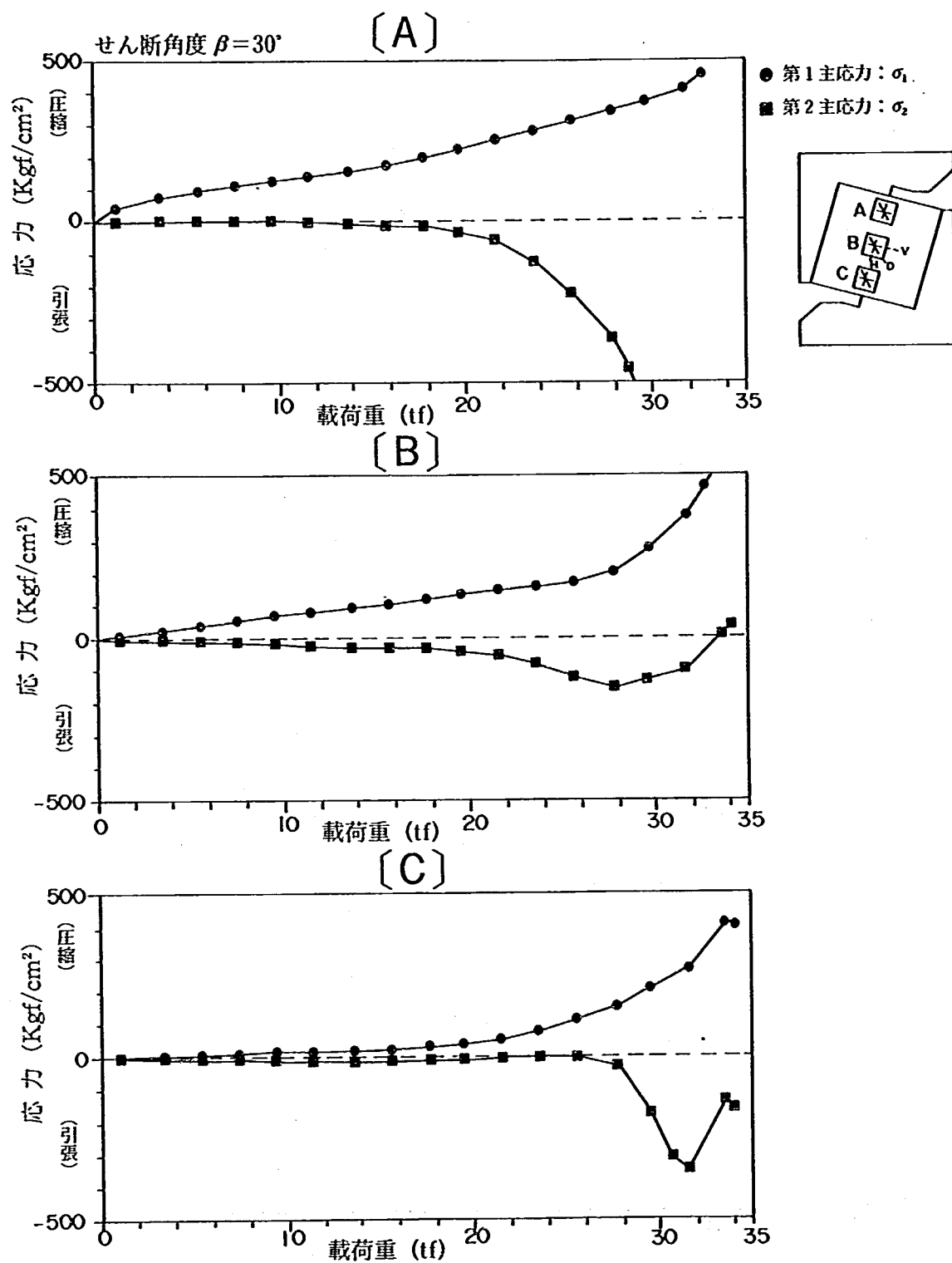


図-21 (e) 実測ひずみから算出した主応力の履歴

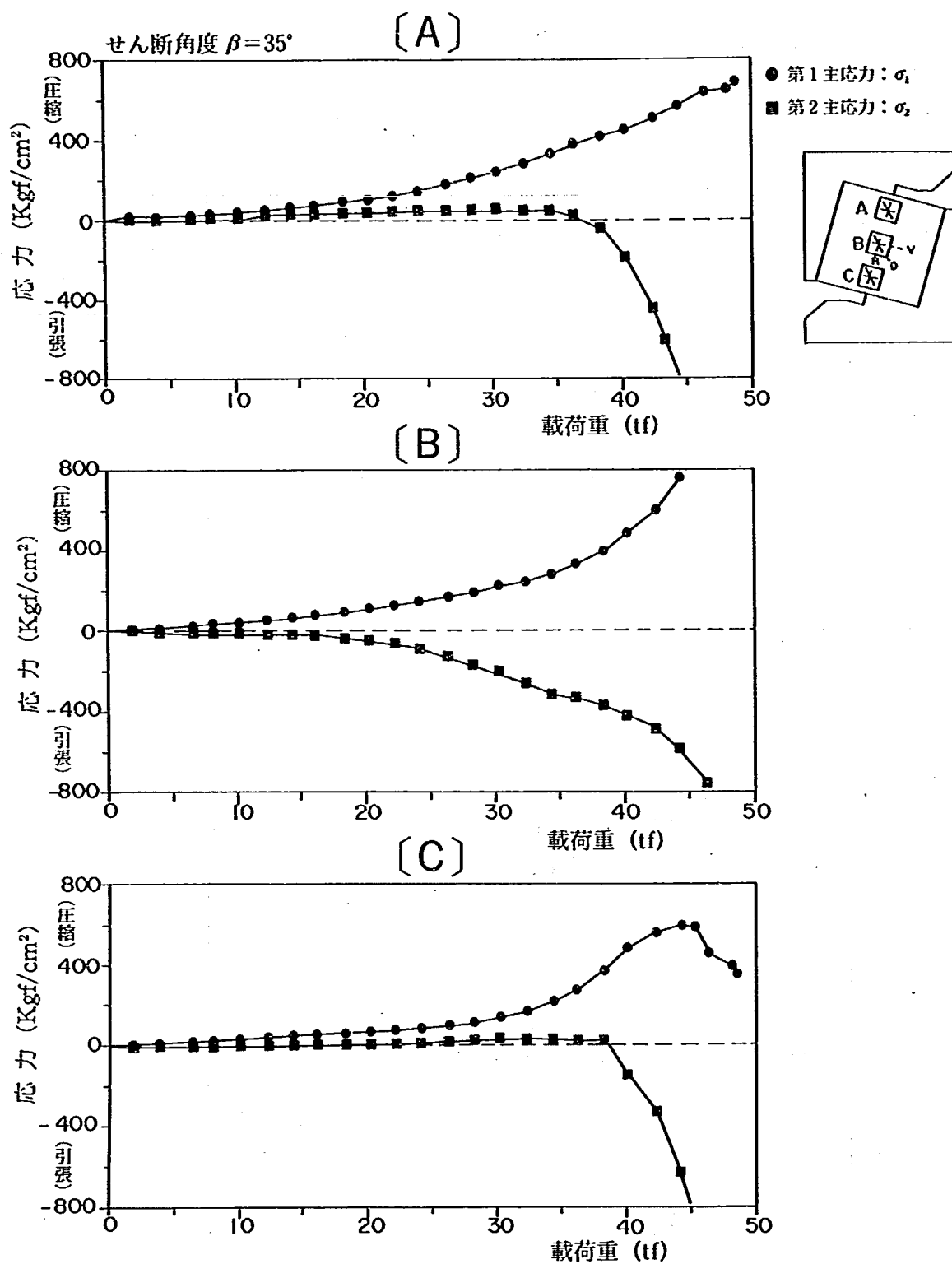
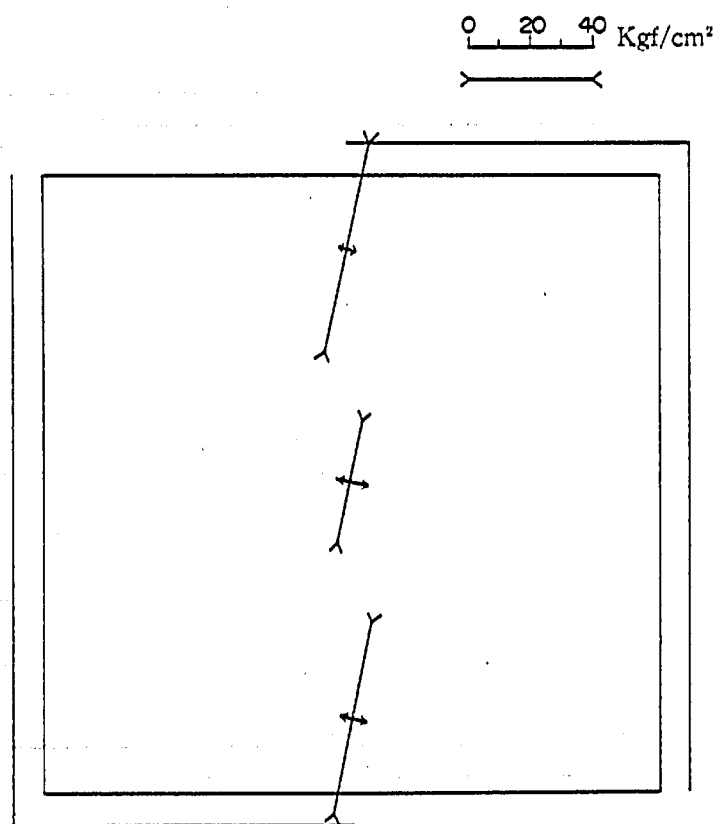
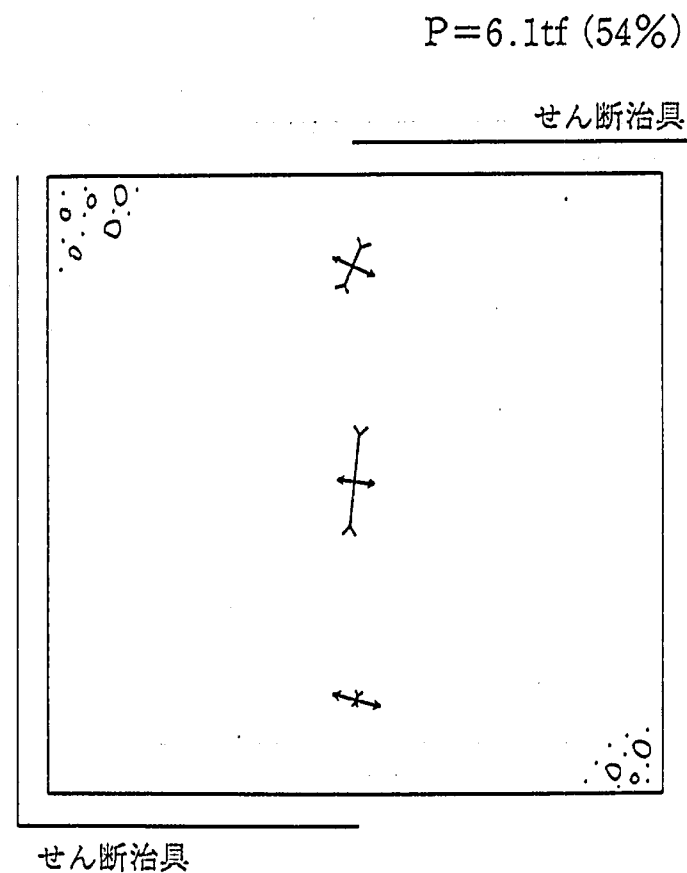


図-21 (f)実測ひずみから算出した主応力の履歴

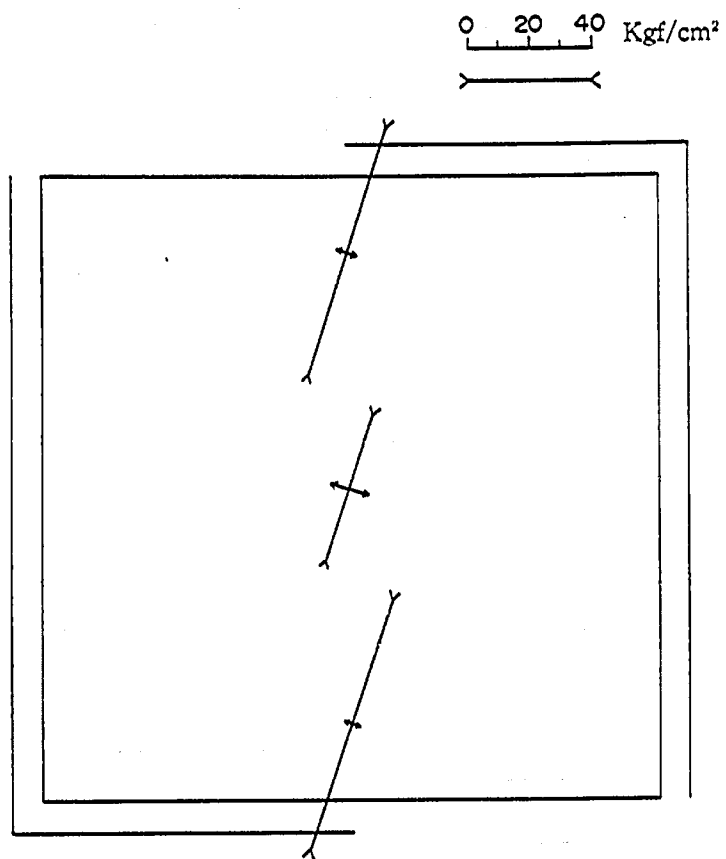


F E M解析による主応力図

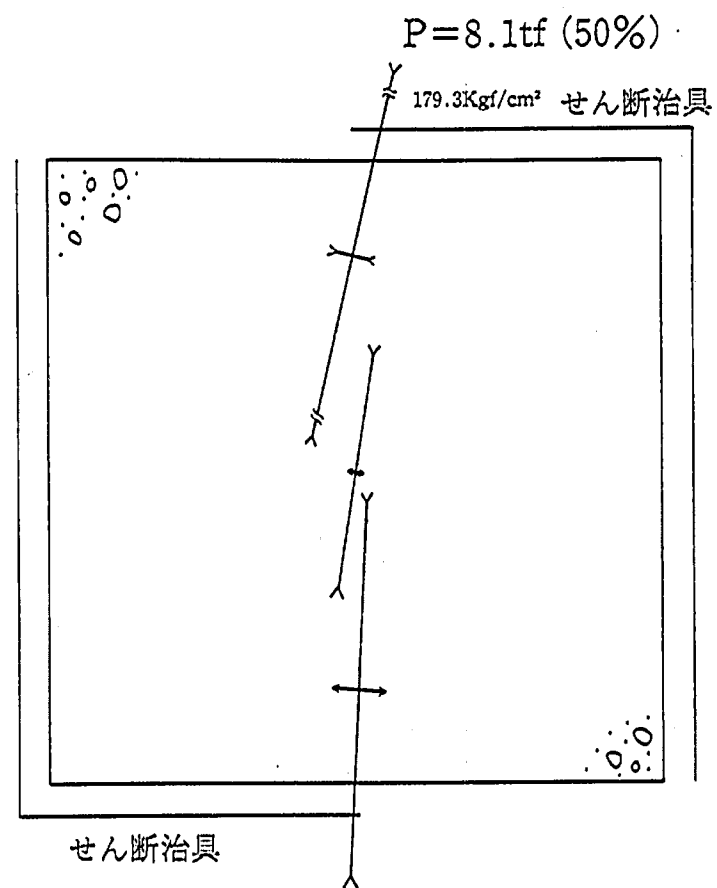


ひずみ計測による主応力図

図-22 (a)計算値と実測値の主応力の比較 ($\beta=10^\circ$)



FEM解析による主応力図



ひずみ計測による主応力図

図-22 (b)計算値と実測値の主応力の比較 ($\beta=15^\circ$)

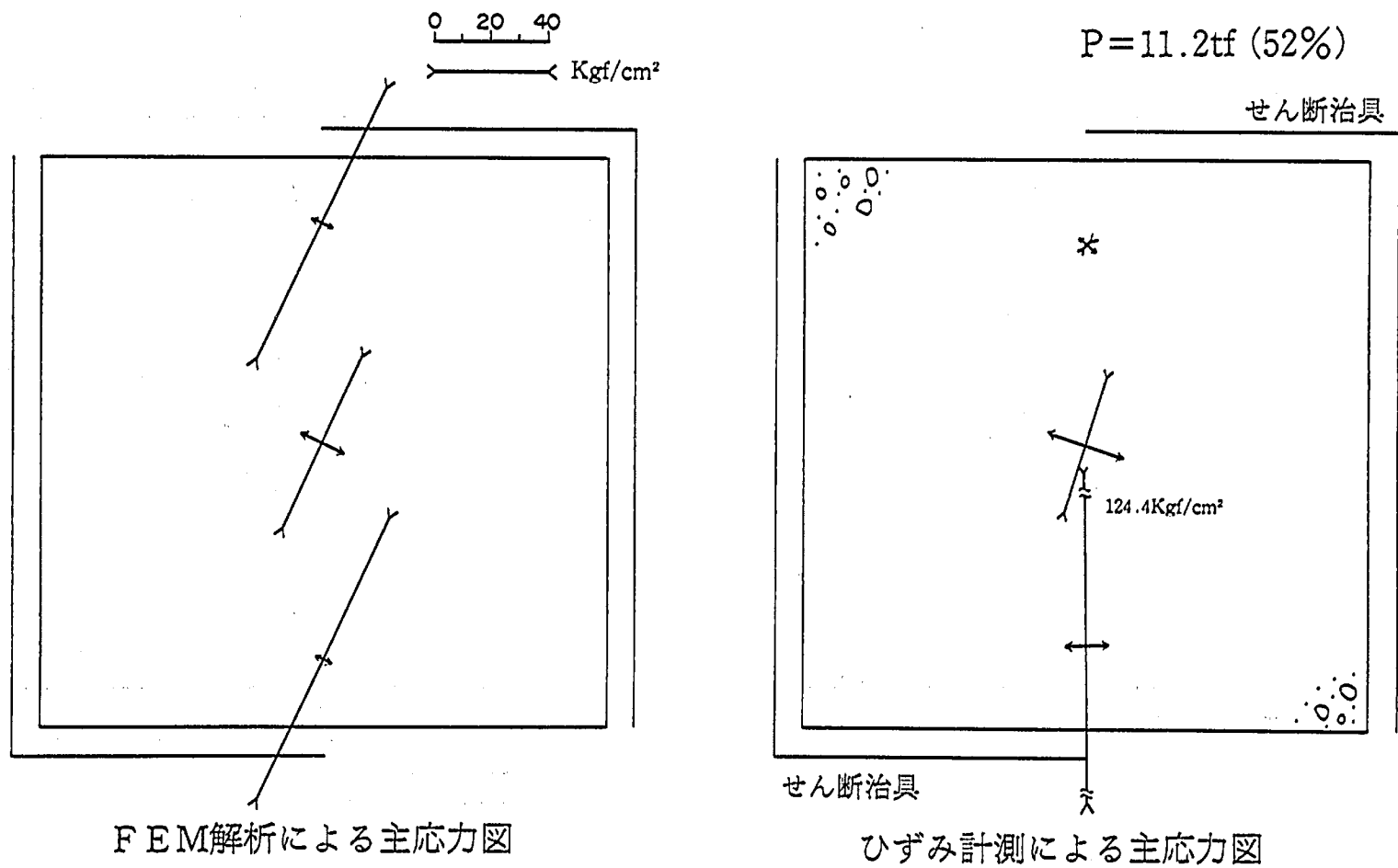


図-22 (c) 計算値と実測値の主応力の比較 ($\beta=20^\circ$)

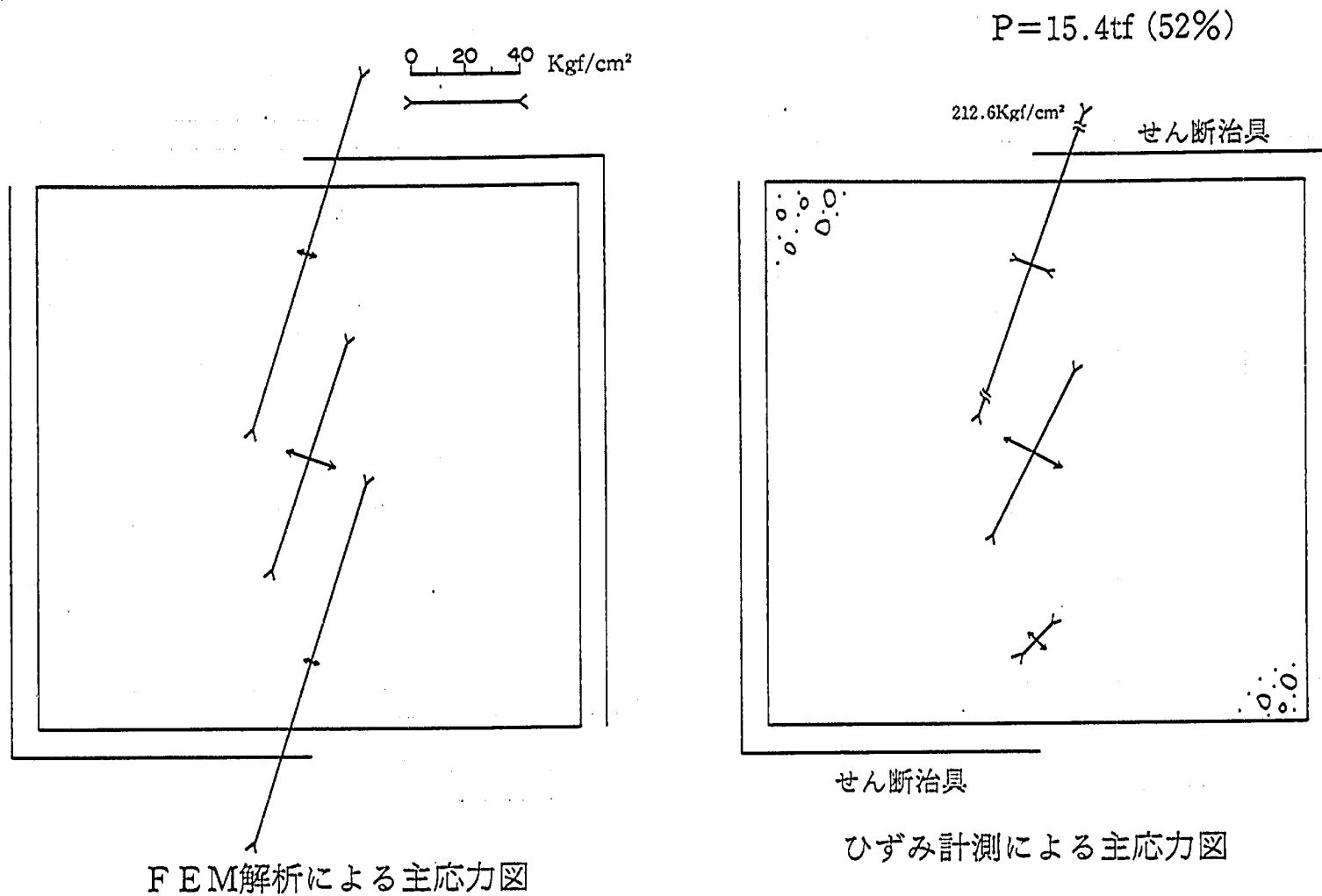
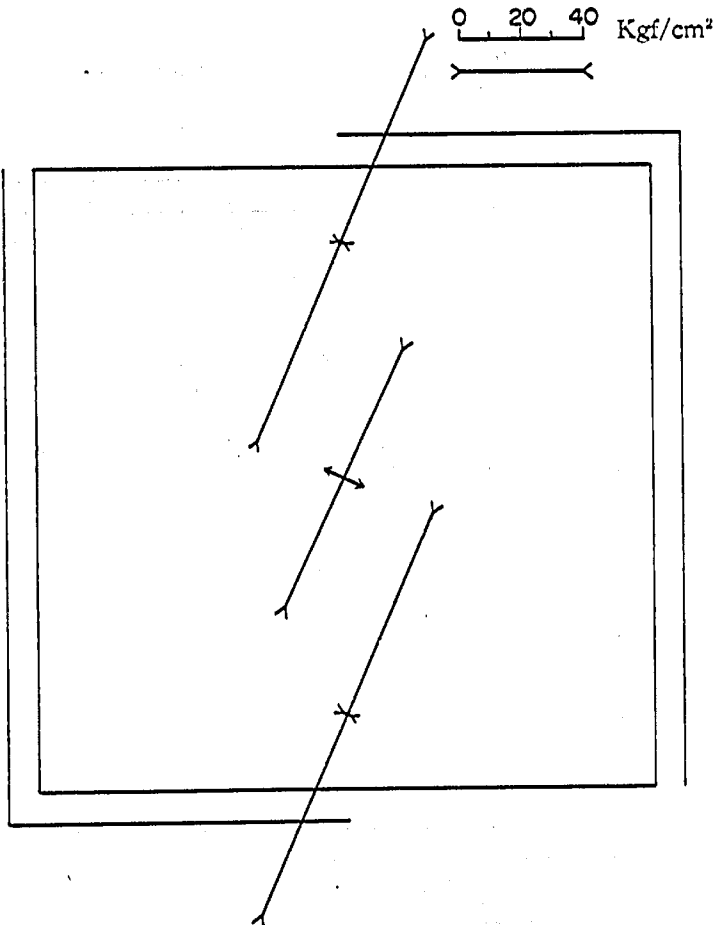
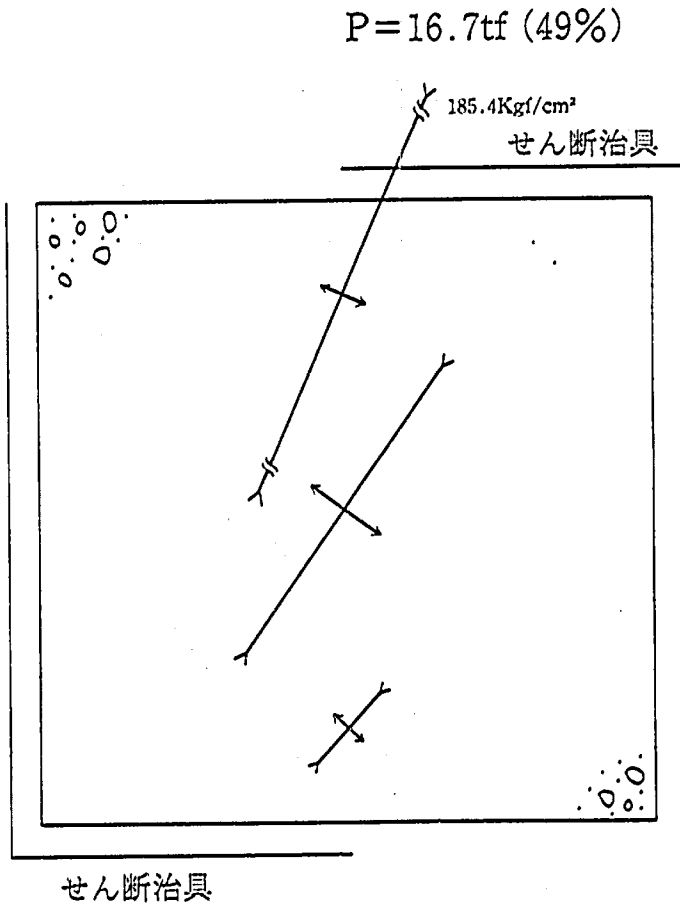


図-22 (d)計算値と実測値の主応力の比較 ($\beta = 25^\circ$)

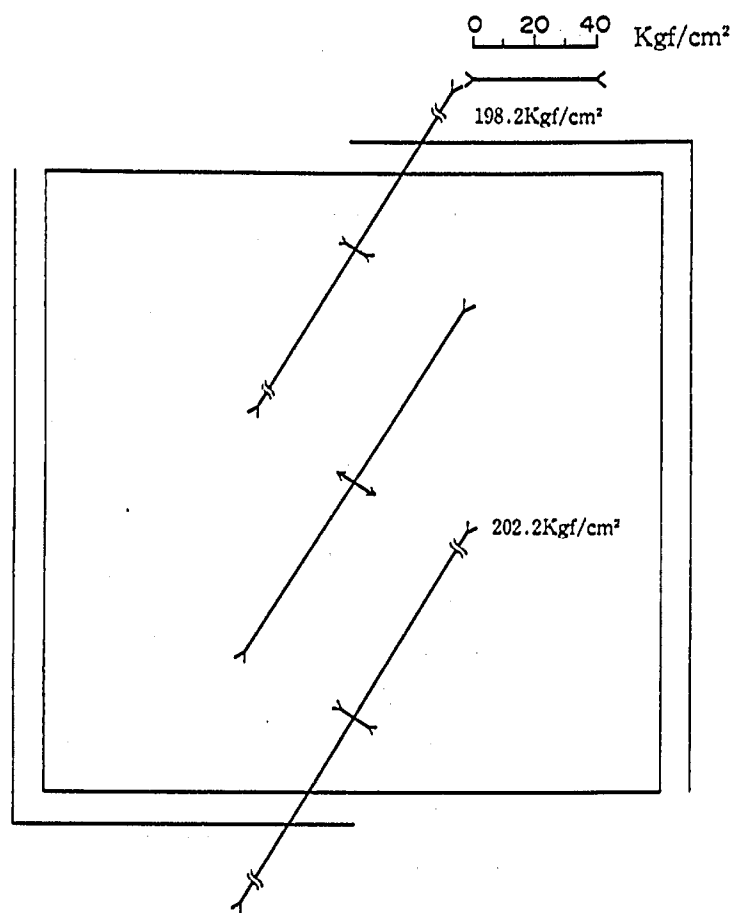


FEM解析による主応力図

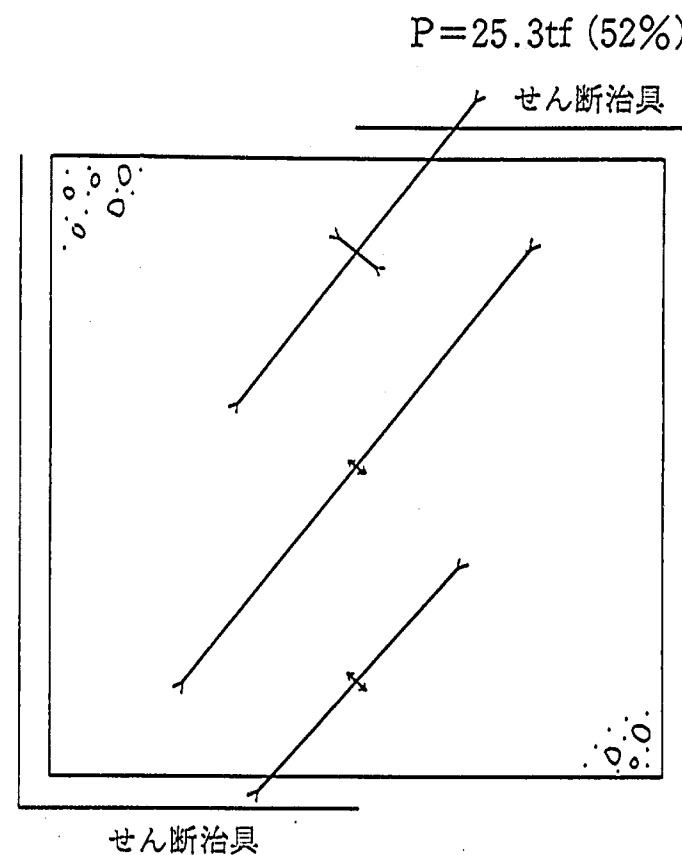


ひずみ計測による主応力図

図-22 (e)計算値と実測値の主応力の比較 ($\beta=30^\circ$)



F E M解析による主応力図



ひずみ計測による主応力図

図-22 (f)計算値と実測値の主応力の比較 ($\beta = 35^\circ$)

4 まとめと考察

今回のせん断試験結果からコンクリートのせん断強度特性についてとりまとめると以下のとおりである。

(1) 一般部のせん断強度と一軸圧縮強度を $\sigma-\tau$ 面において比較すると、せん断強度を表す破壊基準線と一軸圧縮強度に対するモールの応力円とはわずかに交差しているものの、実用上はよく対応しているといえる。なお、両者が交差した理由としては、一面せん断試験中に逐次破壊が生じ、このため測定されたせん断強度が真のせん断強度よりも小さくなったことが考えられる。

(2) 一般部と完全処理した（グリーンカットと敷モルタルを施した）打継目部のせん断強度の間には、有意な差はなく、両者のせん断強度はほぼ同じ値であるといえる。

(3) グリーンカットを行って敷モルタルを塗り込んだケースとグリーンカットを行わないで敷モルタルを塗り込んだケースを比較すると、グリーンカットを行わなかった場合のせん断強度が明かに劣る結果となった。したがって、打継目の処理として、レイタンスを除去し、敷モルタルを施工することは、打継目の一体化を確保する上で極めて重要であるといえる。

(4) せん断試験時のひずみの測定値より、せん断面付近の主応力の大きさと方向を算出し、これを FEM による解析結果と比較した結果、両者の方向と応力値は概ね一致していることがわかった。このため、せん断用治具を用いた今回の試験では、荷重の伝達が適切に行われていると判断することが出来る。

本報告では、従来工法による重力式コンクリートダムに用いられているコンクリートの配合を想定し、そのせん断強度特性を求めた。その結果、せん断強度と一軸圧縮強度の関係、一般部と打継目部のせん断強度の関係について基礎的なデータを得ることができた。したがって、今後とも継続して試験を行い、せん断強度と一軸圧縮強度および打継目部強度の関係についてさらに詳しい検討を行う予定である。また、従来コンクリートのほか、合理的施工法の一つである RCD 工法で用いられるコンクリートの強度特性についても併せて調査試験を進める予定である。なお、せん断試験時のひずみ測定については、今回必ずしも満足いくべき結果は得られなかったが、今後はひずみの測定方法についてさらに検討、改良を加えせん断試験時のひずみ特性について、より詳細な検討を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 河川管理施設等構造令施行規則，昭和 51 年。
- 2) 多目的ダムの建設 3 巻 20 章，昭和 62 年。
- 3) Henny, D. C.: Stability of Stright Concrete Gravity Dams, Trans. of ASCE. Vol. 99, 1934.

コンクリートのせん断強度に
ついての実験的考察(その1)

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2829号
平成2年3月(1990)
ダム部ダム構造研究室
永山 功・渡辺和夫・小林政登

要 旨

本報告は、重力式コンクリートダムの構造設計に用いられる堤体コンクリートの一軸圧縮強度とせん断強度の関係について、実験的検討を行った結果をとりまとめたものである。

実験結果より、コンクリートのせん断強度はモール・クーロンの破壊基準で近似することができ、またこれによってコンクリートの一軸圧縮強度とせん断強度の関係を対応づけられることがわかった。また、打継目部のせん断強度については、これに対して丁寧な処理を行えば、一般部のせん断強度と遜色ない値が得られることがわかった。

キーワード：重力式コンクリートダム，せん断試験，せん断強度，一軸圧縮強度，打継目強度

○

郵便はがき

切手をは
つて下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

ダム構造研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

○

土木研究所資料第 2829 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

⑩

土木研究所資料第 2829 号

○

コンクリートのせん断強度について
の実験的考察