

土木研究所資料

岩盤のせん断強度に及ぼす節理の方向および節理面の
せん断強度の影響に関する実験的研究

平成6年3月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

「Copyright © (1994) 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、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

岩盤のせん断強度に及ぼす節理の方向および節理面の せん断強度の影響に関する実験的研究

ダム構造研究室 室 長 永 山 功
研 究 員 片 平 博
部外研究員 森 田 信 吾

要 旨

コンクリートダムの設計において、岩盤のせん断強度はダムの構造の安定性に大きな影響を及ぼす重要な要素である。本研究は、岩盤内の節理を単純化した模型に対してせん断試験を行い、岩盤内部の節理の方向（角度）および節理面のせん断強度が岩盤のせん断強度に及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。

キーワード：ダム，節理，岩盤，せん断強度

ま え が き

コンクリートダム設計において、岩盤のせん断強度はダムの構造の安定性に大きな影響を及ぼす重要な要素である。岩盤のせん断強度は岩盤を構成する岩片の硬さ、岩盤内の亀裂の間隔、長さ、方向、亀裂の状態などの多くの要因の影響を受ける。ここでは、岩盤のせん断強度に及ぼす亀裂の影響のうち、亀裂の方向と亀裂の状態を取り上げ、これを傾斜角度の異なる板状節理が発達した岩盤としてモデル化し、石膏を用いた岩盤模型を作製して直接せん断試験を実施し、節理の傾斜角度、節理面のせん断強度が岩盤のせん断強度に及ぼす影響について検討を加えた。本論文はその検討結果についてとりまとめたものである。

目 次

まえがき

1	試験の目的	1
2	使用材料の基礎試験	2
2.1	標準水量試験	2
2.2	凝結特性試験	3
3	試験方法	4
3.1	せん断試験装置の概要	4
3.2	供試体の作製方法	5
3.3	試験ケースと供試体の種類	6
3.4	試験仕様	8
4	試験結果	9
4.1	圧縮強度試験	9
4.2	せん断試験	10
5	考察	32
5.1	節理の角度が岩盤供試体の破壊荷重に及ぼす影響	32
5.2	節理の角度とせん断破壊規準の関係	33
5.3	岩片のせん断強度と節理面のせん断強度が岩盤のせん断強度に及ぼす影響	54
5.4	2次元有限要素法による解析結果とせん断試験結果の比較	59
6	まとめ	67
	参考文献	68

1 試 験 の 目 的

ダム設計にあたっては、基礎岩盤の強度特性を把握することを目的として原位置岩盤のせん断試験が実施される。この場合、せん断試験の実施場所は、試験箇所の岩盤の強度特性がダムサイト全体の特性を代表するように慎重に選定されなければならない。このため、実際の試験にあたっては、(1) 岩盤を構成する岩片の硬さ、(2) 岩盤内の亀裂の間隔、(3) 岩盤内の亀裂の状態の3つの要素に基づいてダムサイトの岩盤をいくつかの岩級区分に分類し、各々の岩級を代表していると判定された箇所でせん断試験を実施している。岩盤の強度特性に対してこれらの3要素が大きく影響することは従来のせん断試験結果から明らかであるが、岩級区分と岩盤のせん断強度特性を関係づけるにはこれらの3要素のみでは不十分であるとの指摘もあり、卓越した亀裂の方向の影響を考慮した研究^{1),2),3)}も行われてきた。本研究では、岩盤内の亀裂を板状節理によってモデル化し、節理の方向および節理面のせん断強度が岩盤のせん断強度に及ぼす影響を石膏模型を使用して実験的に検討した。

2 使用材料の基礎試験

2.1 標準水量試験

(1) 試験目的

標準水量試験は、所定の配合で混合した石膏と珪藻土に対する最適な水量を決定するために実施するものである。

(2) 試験方法

測定方法はJIS A 6904の規定に準じて行うものとした。なお、JIS規格では100cm³の水を用いて試験を行うことになっているが、100cm³の水では試験誤差が大きくなることが懸念されたので、本試験での使用水量は300cm³とした。

試験方法は次のとおりである。すなわち、まずビーカーに300cm³の水を入れ、これに所定の割合で混合した石膏と珪藻土の混合物を静かに投入する。沈殿した石膏と珪藻土の混合物の上面が水面と一致して余剰の水がなくなった状態での混合物の投入量を測定し、これを標準水量とする。

(3) 試験結果

試験結果を表-2.1に示す。珪藻土Dと石膏Pの重量混合比D/Pが0%（石膏単体）の場合、水Wと石膏Pの重量混合比W/Pは68%、珪藻土Dと石膏Pの重量混合比D/Pが30%の場合、水Wと石膏Pの重量混合比W/Pは115%となった。

表-2.1 石膏と珪藻土の混合物の標準水量および凝結特性試験結果

珪藻土と石膏 の混合重量比 (%)	水(W) (g)	石膏(P) (g)	珪藻土(D) (g)	W/P (%)	投入終了 (分:秒)	混合開始 (分:秒)	混合終了 (分:秒)	凝結開始 (分:秒)	凝結終了 (分:秒)	試料の体積 (cc)
0	300.5	453.2	0.0	66.3	09:40	11:00	13:00	35:00	46:30	500
0	301.5	433.8	0.0	69.5	18:00	19:00	21:00	40:00	46:30	500
0	299.0	434.6	0.0	68.8	20:00	20:30	22:30	41:00	47:00	500
0	299.0	444.3	0.0	67.3						500
	平 均			68.0						500
30	300.0	266.7	80.0	112.5	06:10	06:30	08:30	14:30	17:50	
30	300.0	255.8	76.7	117.3	07:00	07:30	09:30	15:30	18:50	
	平 均			114.9						
30	300.0	261.1	78.3	114.9	05:30	06:00	08:00	26:30	35:00	

石 膏：吉野石膏 特級
珪藻土：クニライト#100

2.2 凝結特性試験

(1) 試験目的

凝結特性試験は、石膏、珪藻土、水の混合物の凝結開始時間、凝結終了時間を把握するために実施するものである。なお、凝結開始時間と凝結終了時間の定義については試験方法の中で述べる。

(2) 試験方法

測定方法はJIS A 6904の規定に準じて行うものとした。すなわち、標準水量試験終了後の混合液を棒で約2分以上攪拌し、円筒形容器（内径80mm、高さ40mm）にペーストを流し込み、凝結開始時間と凝結終了時間を測定する。凝結開始時間とは凝結時間測定器の標準針が供試体の底から1mmの高さに止まるようになるまでの時間であり、凝結終了時間とは測定器の標準針が供試体の表面から1mmの深さに止まるようになるまでの時間である。

(3) 試験結果

測定結果を表-2.1に示す。珪藻土Dと石膏Pの重量混合比D/Pが0%（石膏単体）の場合、凝結開始時間は39分、凝結終了時間は47分であった。一方、珪藻土Dと石膏Pの重量混合比D/Pが30%の場合、凝結開始時間は15分、凝結終了時間は18分であった。珪藻土を加えると凝結時間が速まる結果となったが、珪藻土を先に水に溶かしてから石膏を投入すると、凝結開始時間を26分、凝結終了時間を35分まで遅らせることができた。

3 試 験 方 法

3.1 せん断試験装置の概要

今回の試験では、せん断面を特定する必要があるため、試験方法として直接せん断試験を行うものとした。直接せん断試験としては、ダム構造研究室で開発した一面せん断用治具を利用し、圧縮強度試験機でせん断強度を測定する方法を採用した。このせん断用治具は図-3.1に示すような構造を有し、圧縮強度試験機に取り付けて想定せん断面に垂直応力とせん断応力を同時に載荷するものである。また、載荷方向とせん断面との傾斜角（せん断角度） β （図-3.1参照）はせん断用治具と上下のスペーサーをそれぞれ取り替えることによって変化させることができる。今回の実験ではせん断角度 β を 20° 、 25° 、 30° の3角度とした。

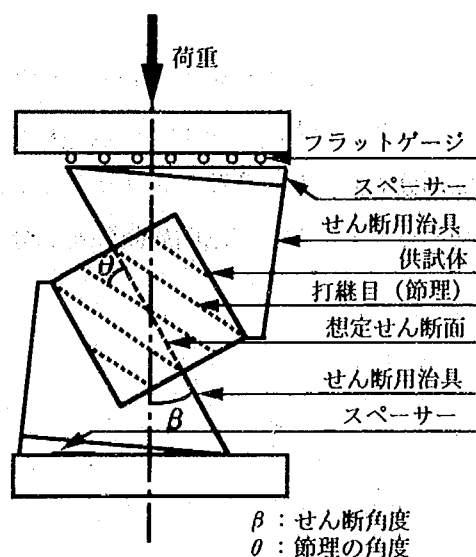


図-3.1 せん断試験機の概要

破壊時に想定せん断面に作用する垂直応力 σ とせん断応力 τ は（1）式によって算出される。

$$\sigma = (P/A) \sin \beta \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\tau = (P/A) \cos \beta$$

ここに、

P：破壊荷重

A：想定せん断面の面積

したがって、同一条件下で製作した供試体に対して種々のせん断角度 β についてせん断試験を行い、破壊時の垂直応力とせん断応力を図-3.2に示すように整理すれば、破壊規準線を求めることができる。

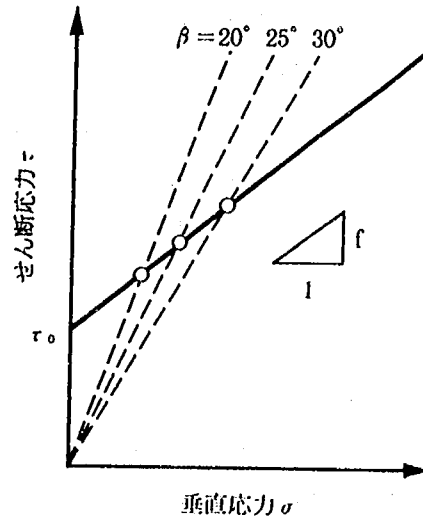


図-3.2 せん断破壊規準の算出方法

3.2 供試体の作製方法

本試験の目的は、岩盤内の節理の方向がせん断強度に及ぼす影響および岩盤を構成する岩片の硬さ、節理面のせん断強度が岩盤のせん断強度に及ぼす影響について検討することである。本試験では、図-3.3に示す形状、寸法の岩盤模型を石膏で作製し、石膏を層状に打設したときに生じる打継目で岩盤内の節理を模擬することにした。なお、岩片の強度は石膏と珪藻土の混合比を変えることによって調整し、節理面の強度は打継目にガーゼを敷くことにより変化させた。また、供試体内の傾斜した節理（打継目）は、型枠を所定の傾斜角を有する架台の上に置き、その中に石膏を流し込むことによって作製した。なお、打継目間隔（層厚）は1 cmとした。

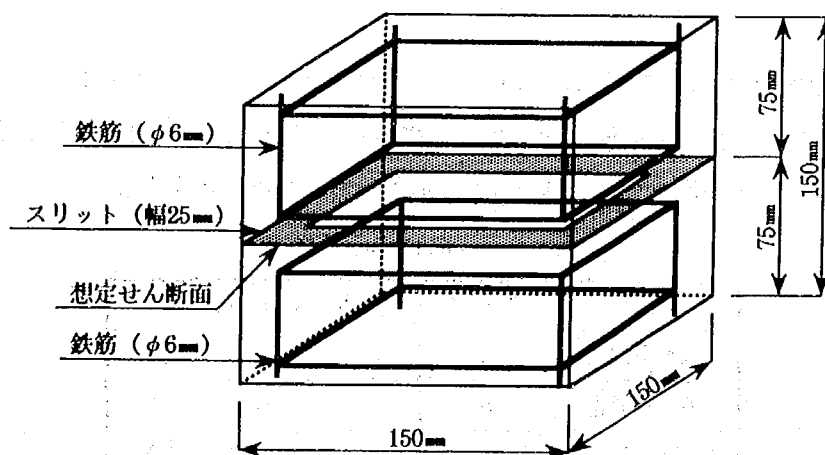


図-3.3 供試体形状および寸法

打継目は供試体中の弱層であるので、打継目を有する供試体をせん断試験すると想定せん断面で破壊せず、打継目沿いに破壊が発生し、想定せん断面沿いのせん断強度が測定できない可能性がある。このため、供試体には図-3.3に示すように補強鉄筋を埋設した。また、想定せん断面の端部には、図-3.3に示すように深さ25mmのスリット（切り欠き）を入れ、想定せん断面に沿って破壊が生じるように工夫した。

なお、脱型後の供試体は、重量がほぼ一定となるまで恒温室（20℃）で乾燥養生した。

3.3 試験ケースと供試体の種類

本研究は、岩盤内の節理の角度、節理面のせん断強度および岩片のせん断強度が岩盤のせん断強度に及ぼす影響について検討するものである。試験ケースは表-3.1に示す3ケースとし、ケース1は珪藻土の重量混合比D/Pが30%で打継目にガーゼがないケース、ケース2は珪藻土を混合せず、打継目にガーゼがないケース、ケース3は珪藻土を混合せず、打継目にガーゼを敷いたケースである。予備的な試験結果から求めた各ケースの岩片および節理面のせん断破壊規準を表-3.1に示す。ケース1とケース3は節理面の純せん断強度が同程度であり、また、ケース2とケース3は岩片の純せん断強度が同一である。なお、各ケースとも岩片と節理面の内部摩擦係数 f は同程度の値を示している。

表-3.1 試験ケース別の配合およびせん断破壊規準

試験ケース	一般部		節理面	
	D/P	破壊規準	ガーゼ	破壊規準
ケース1	30%	$\tau = 13.9 + 0.95 \sigma$	なし	$\tau = 1.9 + 1.05 \sigma$
ケース2	0%	$\tau = 19.9 + 1.29 \sigma$	なし	$\tau = 13.4 + 1.24 \sigma$
ケース3	0%	〃	あり	$\tau = 1.0 + 1.34 \sigma$

供試体内に設ける節理の種類は図-3.4に示すように、節理のないもの（Aタイプ）、中央部水平節理を有するもの（Bタイプ）、流れ目の節理を有するもの（Cタイプ）、さし目の節理を有するもの（Dタイプ）の4種類とし、節理の角度を変えて表-3.2に示す14種類の供試体を作製した。

表-3.2 供試体の種類

種別	タイプ	打継目角度（ θ° ）
節理なし	A	—
水平節理	B	0
流れ目	C	10, 15, 20, 30, 45, 90
さし目	D	15, 25, 30, 35, 45, 60, 90

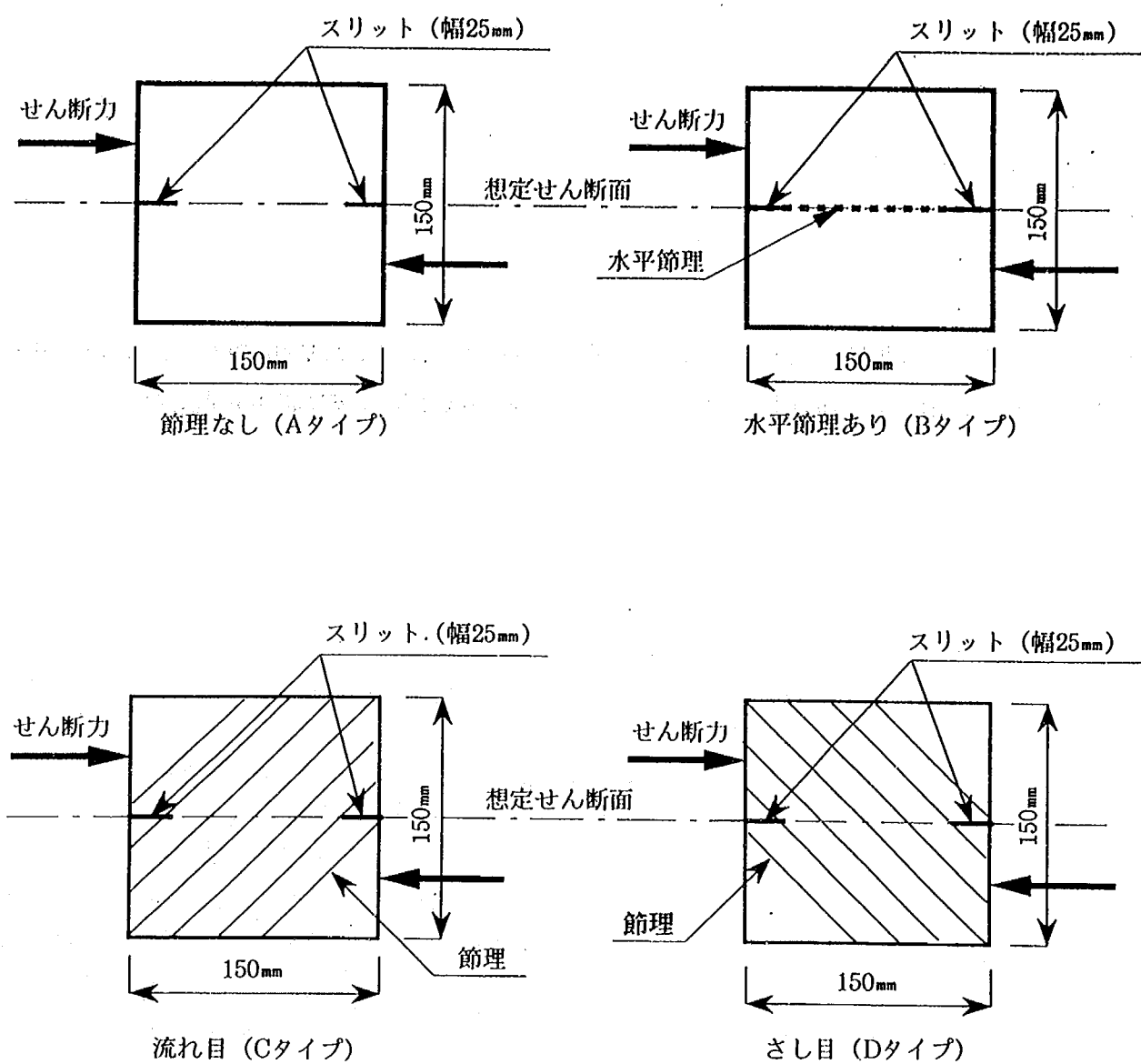


図-3.4 供試体の種別

3.4 試験仕様

(1) せん断角度

せん断試験時のせん断角度は 20° 、 25° 、 30° とした。

(2) 供試体数量

原則として同一条件で2個以上とした。

(3) 載荷速度

載荷速度は毎分600kgfとした。

(4) 圧縮強度試験

使用材料の圧縮強度を把握するために圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験用の供試体は、直径10cm、高さ20cmの円柱供試体とし、作製本数は6本とした。試験時の載荷速度は600kgf/minとした。

4 試 験 結 果

4.1 圧縮強度試験

(1) 珪藻土と石膏の重量混合比D/P=30%の場合

珪藻土と石膏の重量混合比D/P=30%として標準供試体（ $\phi 10\text{cm} \times \text{H}20\text{cm}$ ）を製作し、圧縮強度試験を行った。その結果を表-4.1.1に示す。6本のうち1本だけ小さい圧縮強度を示すものがあり、それを棄却すると、圧縮強度の平均値は74kgf/cm²となった。

表-4.1.1 圧縮強度試験結果 (D/P=30%)

供試体番号	圧縮強度 (kgf/cm ²)	摘要
1	53	棄却
2	75	
3	71	
4	72	
5	75	
6	75	
平均	74	

(2) 珪藻土と石膏の重量混合比D/P=0%の場合

珪藻土と石膏の重量混合比D/P=0%として、石膏単体の標準供試体（ $\phi 10\text{cm} \times \text{H}20\text{cm}$ ）を作製し、圧縮強度試験を行った。その結果を表-4.1.2に示す。試験結果のバラツキは小さく、圧縮強度の平均値は145kgf/cm²となった。

表-4.1.2 圧縮強度試験結果 (D/P=0%)

供試体番号	圧縮強度 (kgf/cm ²)
1	141
2	148
3	145
4	148
5	141
6	146
平均	145

4.2 せん断試験

4.2.1 せん断破壊規準

試験ケース毎のせん断試験結果を表-4.2.1～表-4.2.3に示す。また、せん断試験結果を図-3.2のように整理し、最小二乗法によって求めたせん断破壊規準を表-4.2.4に示す。表-4.2.4より、流れ目では節理の角度の増加とともに純せん断強度 τ_0 も増加することがわかる。また、さし目では比較的低角度で大きなせん断抵抗を示すが、節理の角度の増加とともに純せん断強度 τ_0 は減少し、その後再び増加していることがわかる。なお、これらの結果については5章で詳しく考察する。

4.2.2. 破壊状況

節理の角度とせん断面の破壊形態の関係は、試験ケースによらずほぼ同様であったので、ここではケース1の場合についてのみ詳述する。

(1) 節理なし

図-4.2.1, 写真-4.2.1に破壊状況を示す。破壊面にはせん断破壊に伴う“ずれ”の痕跡が観察され、破壊もすべて想定せん断面付近で発生している。

(2) 節理の角度 0°

供試体はすべて節理面で破壊し、せん断面は平坦である。

(3) 流れ目 10°

図-4.2.2, 写真-4.2.2に破壊状況を示す。破壊面のほとんどを節理面が占めており、節理の影響が顕著である。想定せん断面からの凹凸の最大値は16mm程度で、比較的大きい値となっている。なお、節理にはせん断破壊に伴う“ずれ”の痕跡は認められない。

(4) 流れ目 15°

図-4.2.3, 写真-4.2.3に破壊状況を示す。破壊面に節理面が大きく現れており、節理の影響が顕著である。なお、想定せん断面のスリットはあまり有効に作用していない。せん断角度が 20° の場合、破壊面は節理面に沿って想定せん断面からかなり離れた位置まで入り込んでおり、想定せん断面からの凹凸の最大値は20mm程度である。一方、せん断角度が 25° および 30° の場合、想定せん断面からの凹凸の最大値は10mm程度である。

(5) 流れ目 20°

破壊状況を図-4.2.4, 写真-4.2.4に示す。せん断角度が 20° の場合、破壊面に節理面が比較的大きく現れているが、せん断角度が 25° および 30° の場合には、破壊面は階段状で節理面は大きく現れていない。想定せん断面からの凹凸の最大値は10mm程度であり、節理の角度が 15° の場合と比較すると小さい。

(6) 流れ目 30°

破壊状況を図-4.2.5, 写真-4.2.5に示す。破壊面には一部に節理面が見られるが、岩片内での破壊が多くなっている。せん断角度が 20° の場合、破壊面には節理面に沿った破壊が比較的多く見られ、想定せん断面からの凹凸の最大値は約10mmである。また、破壊面に現れた節理面には、せん断破壊に伴う“ずれ”

の痕跡が認められる。せん断角度が 25° の場合、破壊面は想定せん断面にかかなり近く、想定せん断面からの凹凸の最大値は5 mm程度である。また、破壊面には、せん断破壊に伴う“ずれ”の痕跡が認められ、細かく破砕している。せん断角度が 30° の場合、破壊はほとんど想定せん断面で発生しており、破壊面の凹凸は数mm以下である。また、破壊面付近は細かく破砕している。

(7) 流れ目 45°

破壊状況を図-4.2.6、写真-4.2.6に示す。破壊はほとんど想定せん断面で発生し、破壊面付近は細かく破砕している。

(8) さし目 15°

破壊状況を図-4.2.7、写真-4.2.7に示す。破壊面における節理の占める割合が大きい、節理の角度が小さいため想定せん断面からの凹凸量の最大値は8 mm程度と小さい。

(9) さし目 25°

破壊状況を図-4.2.8、写真-4.2.8~4.2.9に示す。せん断角度が 20° の場合、破壊は曲げによって発生し、その様子は写真-4.2.8によく表わされている。せん断角度が 25° および 30° の場合、写真-4.2.9に示すように破壊はほぼ想定せん断面で発生し、破壊面にはせん断破壊に伴う“ずれ”の痕跡が観察される。破壊面の凹凸の最大値は8 mm程度である。

(10) さし目 30°

破壊状況を図-4.2.9、写真-4.2.10~4.2.11に示す。せん断角度が 20° および 25° の場合、破壊は曲げによって発生し、その様子は写真-4.2.10によく表わされている。特に、供試体の中心部分はバラバラで破断面の凹凸は激しい。破断は想定せん断面から35mm程度離れたところまで達している。一方、せん断角度が 30° の場合は写真-4.2.11に示すように破壊はほぼ想定せん断面で発生している。破壊面にはせん断破壊に伴う“ずれ”の痕跡が観察される。破壊面の凹凸の最大値は5 mm程度である。

(11) さし目 35°

破壊状況を図-4.2.10、写真-4.2.12に示す。せん断角度の大きさにかかわらず破壊は曲げによって発生している。破壊面の凹凸の最大値はせん断角度が 20° の場合で約35mmと大きい、せん断角度が 30° になると約20mm程度となっている。

(12) さし目 45°

破壊状況を図-4.2.11、写真-4.2.13に示す。せん断角度の大きさにかかわらず、破壊は曲げによって発生している。節理の角度が 45° と大きいため、想定せん断面からの凹凸の最大値は40mm程度に達している。

(13) さし目 60°

破壊状況を図-4.2.12、写真-4.2.14に示す。さし目 45° と破壊形態は同様である。

(14) 節理の角度 90°

破壊状況を図-4.2.13、写真-4.2.15に示す。破壊はほぼ想定せん断面で発生し、節理の影響はみられない。破壊面にはせん断破壊に伴う“ずれ”の痕跡が観察され、破壊面の凹凸の最大値は5 mm程度である。

表-4.2.1(1) せん断試験結果 (ケース1, 珪藻土の重量混合比30%, 流れ目)

種 別	供試体番号	せん断角度 (°)	荷重 (N)	垂直応力 (kgf/cm ²)	せん断応力 (kgf/cm ²)	摘要
節理なし	A-20-1	20	2.185	7.473	20.532	
	A-20-2	20	2.300	7.866	21.613	
	A-20-3	20	2.285	7.815	21.472	
	A-20-4	20	2.130	7.285	20.015	
	A-25-1	25	3.200	13.524	29.002	
	A-25-2	25	2.500	10.565	22.658	
	A-25-3	25	3.270	13.820	29.636	
	A-25-4	25	2.370	10.016	21.479	
	A-30-3	30	3.750	18.750	32.476	
	A-30-4	30	3.260	16.300	28.232	
水平節理あり	B-20-1	20	0.680	1.034	2.840	
	B-20-2	20	0.690	1.049	2.882	
	B-25-1	25	0.930	1.747	3.746	
	B-25-2	25	1.175	2.207	4.733	
	B-30-1	30	0.990	2.200	3.811	
	B-30-2	30	1.230	2.733	4.734	
流れ目	C10-20-1	20	0.970	3.318	9.115	
	C10-20-2	20	1.420	3.454	9.491	せん断面積補正
	C10-25-1	25	0.970	4.099	8.791	
	C10-25-2	25	1.420	4.015	8.610	せん断面積補正
	C10-30-1	30	1.900	9.500	16.454	
	C15-20-1	20	1.510	3.762	10.337	せん断面積補正
	C15-20-2	20	1.230	4.207	11.558	
	C15-25-1	25	1.850	7.818	16.767	
	C15-30-1	30	2.130	10.650	18.446	
	C15-30-2	30	2.150	10.750	18.620	
	C20-20-1	20	1.370	4.686	12.874	
	C20-20-2	20	1.425	4.446	12.216	せん断面積補正
	C20-20-3	20	1.860	6.362	17.478	
	C20-25-1	25	1.220	5.156	11.057	
	C20-25-2	25	1.690	7.142	15.317	
	C20-25-3	25	1.980	8.368	17.945	
	C20-30-1	30	2.430	12.150	21.044	
	C20-30-2	30	1.990	9.950	17.234	
	C30-20-1	20	1.530	5.233	14.377	
	C30-20-2	20	1.600	5.472	15.035	
	C30-20-3	20	1.860	6.362	17.478	
	C30-25-1	25	2.080	8.790	18.851	
	C30-25-2	25	1.800	7.607	16.314	
	C30-30-1	30	2.350	11.750	20.352	
	C30-30-2	30	3.540	17.700	30.657	
	C30-30-3	30	3.670	18.350	31.783	
	C45-20-1	20	2.040	6.977	19.170	
	C45-20-2	20	1.950	6.669	18.324	
	C45-25-1	25	2.970	12.552	26.917	
	C45-25-2	25	2.500	10.565	22.658	
	C45-30-1	30	3.960	19.800	34.295	
	C45-30-2	30	3.230	16.150	27.973	

表-4.2.1(2) せん断試験結果 (ケース1, 珪藻土の重量混合比30%, さし目)

種 別	供試体番号	せん断角度 (°)	荷重 (t)	垂直応力 (kgf/cm ²)	せん断応力 (kgf/cm ²)	摘要
筋理なし	A-20-2	20	2.300	7.866	21.613	
	A-20-3	20	2.285	7.815	21.472	
	A-20-4	20	2.130	7.285	20.015	
	A-25-1	25	3.200	13.524	29.002	
	A-25-2	25	2.500	10.565	22.658	
	A-25-3	25	3.270	13.820	29.636	
	A-25-4	25	2.370	10.016	21.479	
	A-30-3	30	3.750	18.750	32.476	
	A-30-4	30	3.260	16.300	28.232	
水平筋理あり	B-20-1	20	0.680	1.034	2.840	
	B-20-2	20	0.690	1.049	2.882	
	B-25-1	25	0.930	1.747	3.746	
	B-25-2	25	1.175	2.207	4.733	
	B-30-1	30	0.990	2.200	3.811	
	B-30-2	30	1.230	2.733	4.734	
さし目	D15-20-1	20	1.950	6.669	18.324	
	D15-25-1	25	2.790	11.791	25.286	
	D15-30-1	30	2.935	14.675	25.418	
	D25-20-1	20	1.840	6.293	17.290	
	D25-25-1	25	3.645	15.404	33.035	
	D25-30-1	30	4.555	22.775	39.447	
	D30-20-1	20	1.180	4.036	11.088	
	D30-25-1	25	2.600	10.988	23.564	
	D30-25-2	25	2.560	10.819	23.201	
	D30-30-1	30	4.320	21.600	37.412	
	D30-30-2	30	3.210	16.050	27.799	
	D30-30-3	30	4.435	22.175	38.408	
	D35-20-1	20	1.020	3.489	9.585	
	D35-25-1	25	1.630	6.889	14.773	
	D35-30-1	30	3.260	16.300	28.232	
	D45-20-1	20	1.030	3.523	9.679	
	D45-20-2	20	0.930	3.181	8.739	
	D45-25-1	25	1.360	5.748	12.326	
	D45-25-2	25	1.330	5.621	12.054	
	D45-30-1	30	1.660	8.300	14.376	
	D45-30-2	30	1.415	7.075	12.254	
	D60-20-1	20	1.310	4.480	12.310	
	D60-25-1	25	1.515	6.403	13.731	
	D60-30-1	30	1.490	7.450	12.904	
	D90-20-1	20	2.370	8.106	22.271	
	D90-25-1	25	2.895	12.235	26.238	
	D90-30-1	30	3.810	19.050	32.996	

表-4.2.2 せん断試験結果 (ケース2, 珪藻土の重量混合比0%, ガーゼなし)

種 別	供試体番号	せん断角度 (°)	荷重 (t)	垂直応力 (kgf/cm ²)	せん断応力 (kgf/cm ²)	摘要
節理なし	A-15-2	15	3.047	7.885	29.429	
	A-20-1	20	3.853	13.179	36.209	
	A-20-2	20	4.380	14.981	41.159	
	A-25-1	25	5.013	21.187	45.436	
	A-25-2	25	5.833	24.653	52.868	
水平節理あり	B-15-1	15	1.813	4.693	17.515	
	B-15-2	15	2.293	5.936	22.152	
	B-20-1	20	2.596	8.877	24.390	
	B-20-2	20	2.631	8.999	24.724	
	B-25-1	25	3.733	15.778	33.835	
	B-25-2	25	3.191	13.486	28.921	
流れ目	C10-20-1	20	3.140	10.739	29.506	
	C10-20-2	20	3.560	12.176	33.453	
	C10-25-1	25	3.140	13.270	28.458	
	C10-25-2	25	3.640	15.383	32.990	
	C10-30-1	30	4.210	21.050	36.460	
	C10-30-2	30	5.775	28.875	50.013	
	C15-20-1	20	4.100	14.023	38.527	
	C15-25-1	25	3.645	15.404	33.035	
	C15-30-1	30	5.420	27.100	46.939	
	C20-20-1	20	3.310	11.321	31.104	
	C20-25-1	25	4.320	18.257	39.152	
	C20-30-1	30	4.610	23.050	39.924	
	C30-20-1	20	3.380	11.560	31.762	
	C30-20-2	20	4.090	13.989	38.433	
	C30-25-1	25	5.360	22.652	48.578	
	C30-25-2	25	6.715	28.379	60.859	
	C30-30-1	30	6.090	30.450	52.741	
	C30-30-2	30	6.600	33.000	57.158	
	C45-20-1	20	3.960	13.544	37.212	
	C45-25-1	25	4.740	20.032	42.959	
	C45-30-1	30	7.145	35.725	61.877	
さし目	D15-20-1	20	3.600	12.313	33.829	
	D15-25-1	25	5.200	21.976	47.128	
	D15-30-1	30	6.610	33.050	57.244	
	D20-20-1	20	3.880	13.270	36.460	
	D20-25-1	25	6.670	28.189	60.451	
	D20-30-1	30	5.645	28.225	48.887	
	D25-20-1	20	4.265	14.587	40.078	
	D25-25-1	25	6.780	28.654	61.448	
	D25-30-1	30	9.235	46.175	79.977	
	D30-20-2	20	3.725	12.740	35.004	
	D30-25-2	25	5.950	25.146	53.925	
	D30-30-2	30	8.940	44.700	77.423	
	D35-20-1	20	2.045	6.994	19.217	
	D35-25-1	25	3.300	13.946	29.908	
	D35-30-1	30	6.200	31.000	53.694	
	D45-20-1	20				
	D45-25-1	25	2.920	12.340	26.464	
	D45-30-1	30	3.595	17.975	31.134	
	D60-20-1	20	2.780	9.508	26.123	
	D60-25-1	25	3.635	15.362	32.944	
	D60-30-1	30	4.180	20.900	36.200	
	D90-20-1	20	3.105	10.620	29.177	
	D90-25-1	25	5.655	23.899	51.252	
	D90-30-1	30	6.990	34.950	60.535	

表-4.2.3 せん断試験結果 (ケース 3, 珪藻土の重量混合比0%, ガーゼあり)

種 別	供試体番号	せん断角度 (°)	荷重 (t)	垂直応力 (kgf/cm ²)	せん断応力 (kgf/cm ²)	摘要
節理なし	A-15-2	15	3.047	7.885	29.429	
	A-20-1	20	3.853	13.179	36.209	
	A-20-2	20	4.380	14.981	41.159	
	A-25-1	25	5.013	21.187	45.436	
	A-25-2	25	5.833	24.653	52.868	
水平節理あり	B-15-1	15	0.054	0.140	0.524	
	B-20-1	20	0.467	1.596	4.385	
	B-20-2	20	0.241	0.824	2.264	
	B-25-1	25	0.435	1.837	3.939	
	B-25-2	25	0.766	3.238	6.944	
	B-30-1	30	0.796	3.978	6.890	
流れ目	C15-20-1	20	0.700	2.394	6.578	
	C15-25-1	25	1.280	5.410	11.601	
	C15-30-1	30	1.865	9.325	16.151	
	C20-10-1	10	0.730	1.268	7.189	
	C20-15-1	15	0.734	1.900	7.090	
	C20-20-1	20	0.889	3.041	8.354	
	C20-20-2	20	0.725	2.480	6.813	
	C20-25-1	25	1.406	5.942	12.743	
	C20-30-1	30	1.850	9.250	16.021	
	C20-30-2	30	1.680	8.400	14.549	
	C20-30-3	30	1.910	9.550	16.541	
	C30-20-1	20	1.230	4.207	11.558	
	C30-20-2	20	1.080	3.694	10.149	
	C30-20-3	20	1.560	5.336	14.659	
	C30-25-1	25	1.580	6.677	14.320	
	C30-25-2	25	1.830	7.734	16.585	
	C30-25-3	25	1.410	5.959	12.779	
	C30-30-1	30	3.375	16.875	29.228	
	C30-30-2	30	3.400	17.000	29.445	
	C30-30-3	30	3.190	15.950	27.626	
	C45-20-1	20	2.100	7.182	19.734	
	C45-25-1	25	2.350	9.932	21.298	
	C45-30-1	30	3.660	18.300	31.697	
さし目	D15-20-1	20	4.080	13.954	38.339	
	D15-25-1	25	6.960	29.414	63.079	
	D15-30-1	30	5.840	29.200	50.576	
	D25-20-1	20	3.030	10.363	28.473	
	D25-25-1	25	5.355	22.631	48.533	
	D25-30-1	30	7.250	36.250	62.787	
	D30-20-1	20	2.120	7.251	19.921	
	D30-20-2	20	1.675	7.251	19.921	
	D30-25-1	25	4.330	18.299	39.243	
	D30-25-2	25	3.660	15.468	33.171	
	D30-30-1	30	7.100	35.500	61.488	
	D30-30-2	30	7.360	36.800	63.739	
	D35-20-1	20	1.155	3.950	10.853	
	D35-25-1	25	2.730	11.538	24.742	
	D35-30-1	30	4.720	23.600	40.876	
	D45-20-1	20	0.680	2.326	6.390	
	D45-25-1	25	1.860	7.861	16.857	
	D45-30-1	30	2.310	11.550	20.005	
	D60-20-1	20	1.225	4.190	11.511	
	D60-25-1	25	2.135	9.023	19.350	
	D60-30-1	30	2.650	13.250	22.950	
	D90-20-1	20	3.105	10.620	29.177	
	D90-25-1	25	5.655	23.899	51.252	
	D90-30-1	30	6.990	34.950	60.535	

表-4.2.4 節理の角度とせん断破壊規準の関係

試験ケース 節理の角度		ケース 1	ケース 2	ケース 3
		D/P=30%	D/P=0%, ガーゼなし	D/P=0%, ガーゼあり
節理なし		$\tau = 13.9 + 0.95 \sigma$	$\tau = 19.9 + 1.290 \sigma$	$\tau = 19.9 + 1.290 \sigma$
0°		$\tau = 1.9 + 1.05 \sigma$	$\tau = 13.4 + 1.235 \sigma$	$\tau = 1.0 + 1.344 \sigma$
流れ目	10°	$\tau = 4.3 + 1.27 \sigma$	$\tau = 19.0 + 0.954 \sigma$	
	15°	$\tau = 6.8 + 1.15 \sigma$	$\tau = 23.4 + 0.856 \sigma$	$\tau = 3.6 + 1.371 \sigma$
	20°	$\tau = 9.3 + 0.88 \sigma$	$\tau = 23.0 + 0.781 \sigma$	$\tau = 5.0 + 1.161 \sigma$
	30°	$\tau = 8.4 + 1.20 \sigma$	$\tau = 22.1 + 1.121 \sigma$	$\tau = 5.6 + 1.389 \sigma$
	45°	$\tau = 11.5 + 1.10 \sigma$	$\tau = 21.3 + 1.129 \sigma$	$\tau = 11.1 + 1.115 \sigma$
さし目	15°	$\tau = 12.6 + 0.94 \sigma$	$\tau = 20.8 + 1.124 \sigma$	$\tau = 21.3 + 1.213 \sigma$
	25°	$\tau = 9.8 + 1.36 \sigma$	$\tau = 23.1 + 1.255 \sigma$	$\tau = 16.1 + 1.320 \sigma$
	30°	$\tau = 6.0 + 1.46 \sigma$	$\tau = 19.2 + 1.316 \sigma$	$\tau = 10.2 + 1.462 \sigma$
	35°	$\tau = 4.6 + 1.45 \sigma$	$\tau = 9.5 + 1.428 \sigma$	$\tau = 5.8 + 1.511 \sigma$
	45°	$\tau = 6.2 + 0.95 \sigma$	$\tau = 16.2 + 0.839 \sigma$	$\tau = 3.5 + 1.509 \sigma$
	60°	$\tau = 9.0 + 0.74 \sigma$	$\tau = 18.2 + 0.887 \sigma$	$\tau = 6.7 + 1.271 \sigma$
90°		$\tau = 14.3 + 0.98 \sigma$	$\tau = 16.9 + 1.301 \sigma$	$\tau = 16.9 + 1.301 \sigma$

(単位 : kgf/cm²)

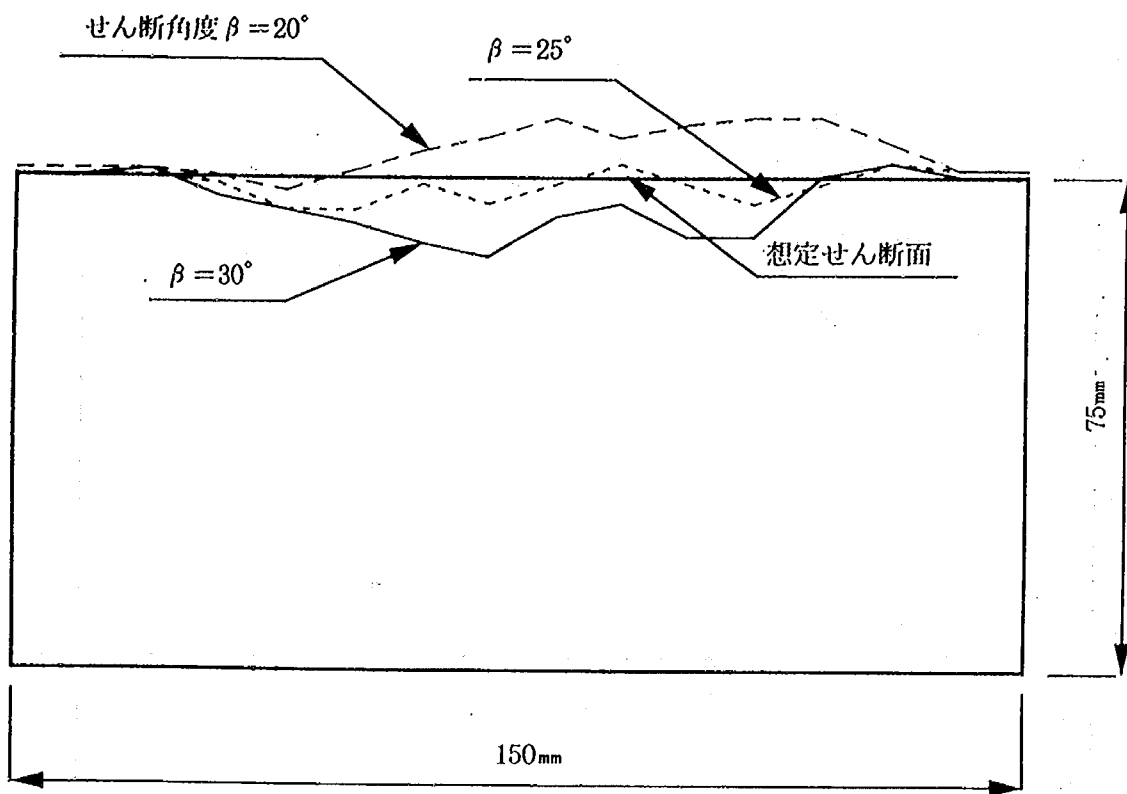


図-4.2.1 破壊面形状 (節理なし)

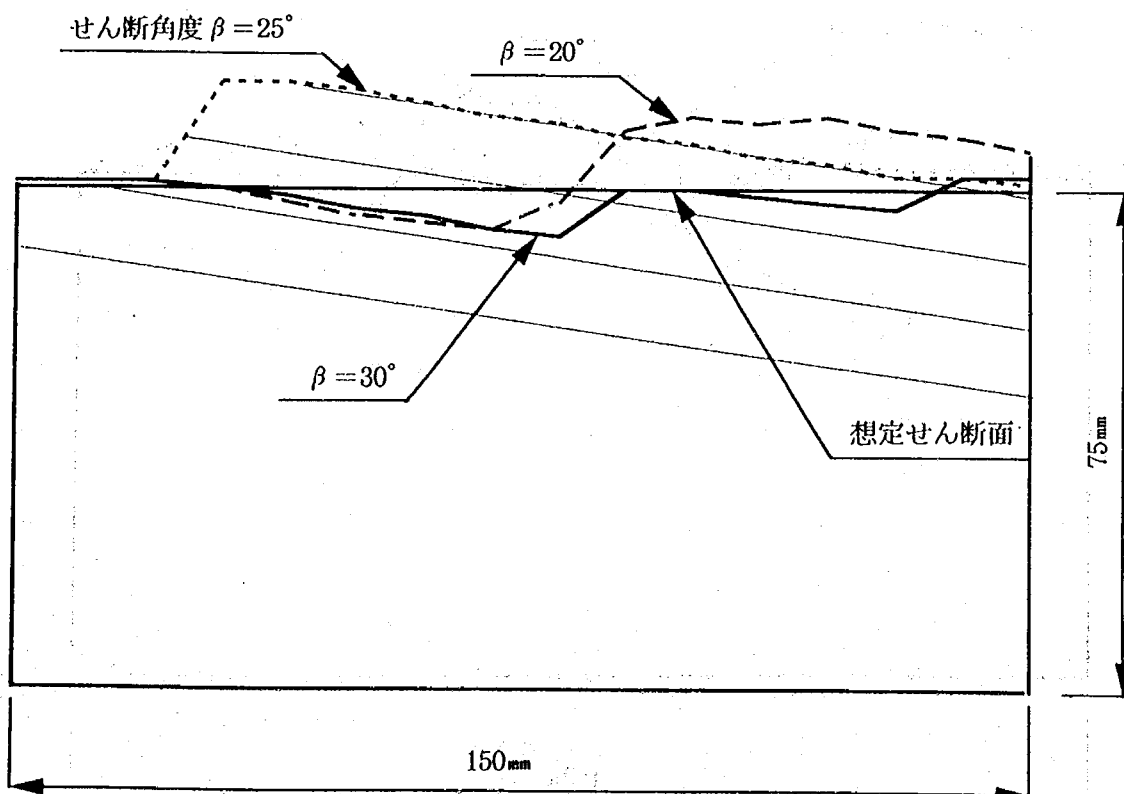


図-4.2.2 破壊面形状 (流れ目 10°)

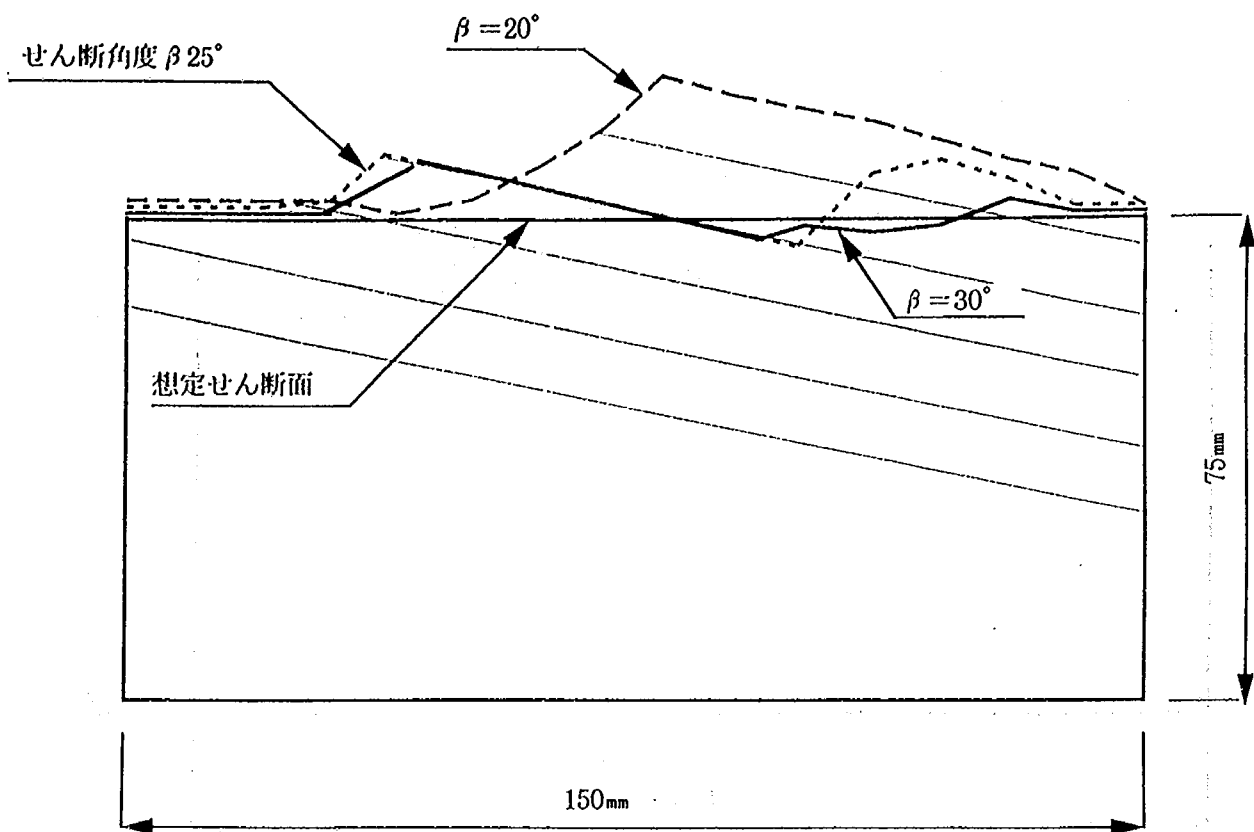


図-4.2.3 破壊面形状 (流れ目 15°)

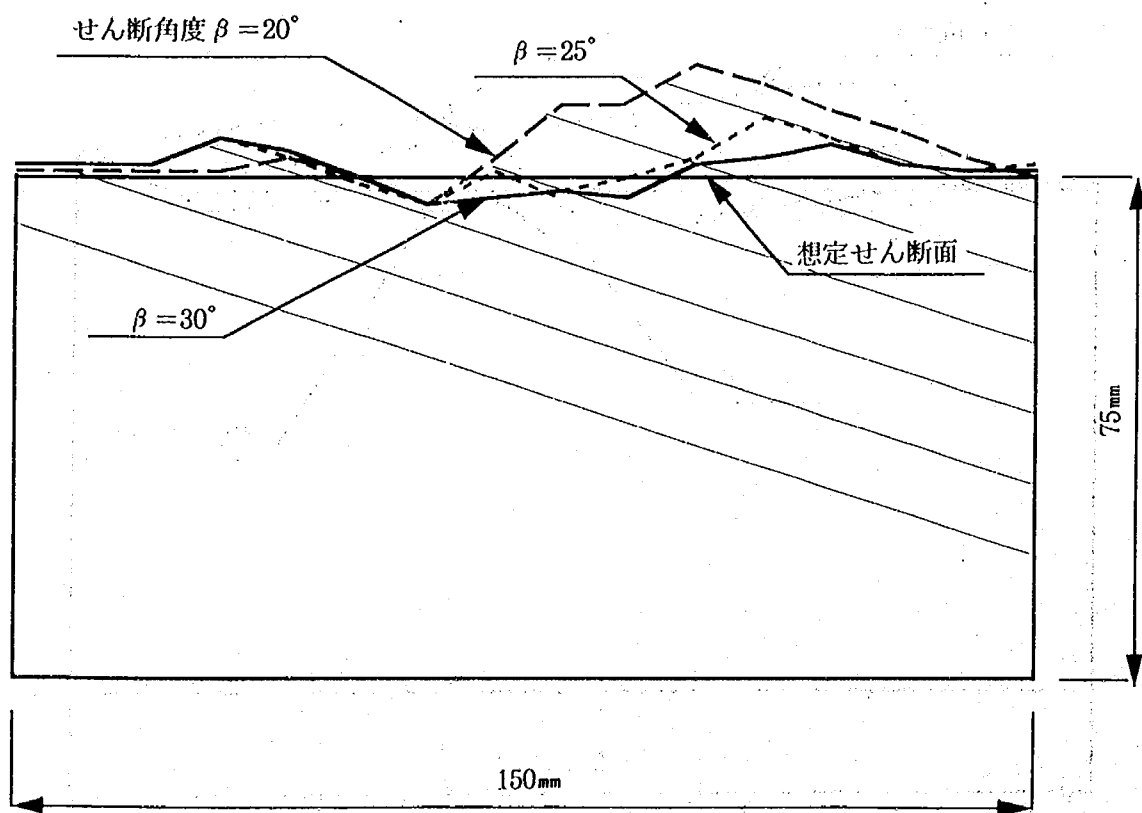


図-4.2.4 破壊面形状 (流れ目 20°)

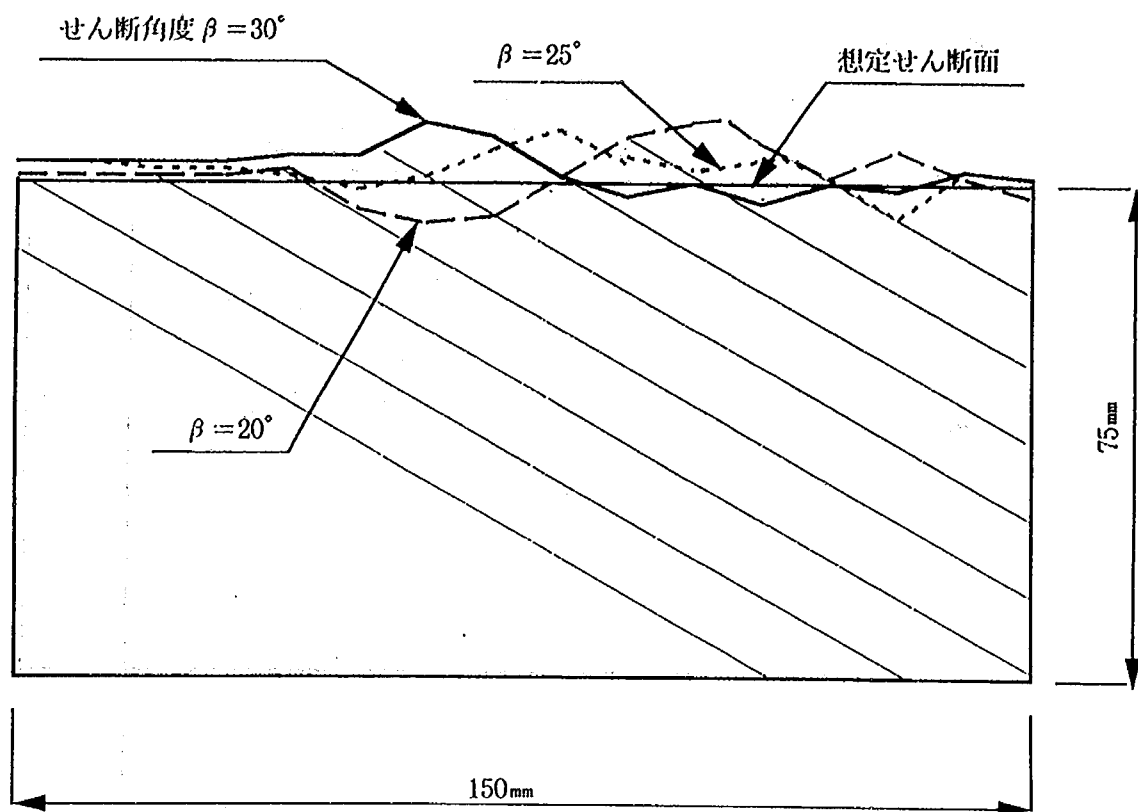


図-4.2.5 破壊面形状（流れ目 30° ）

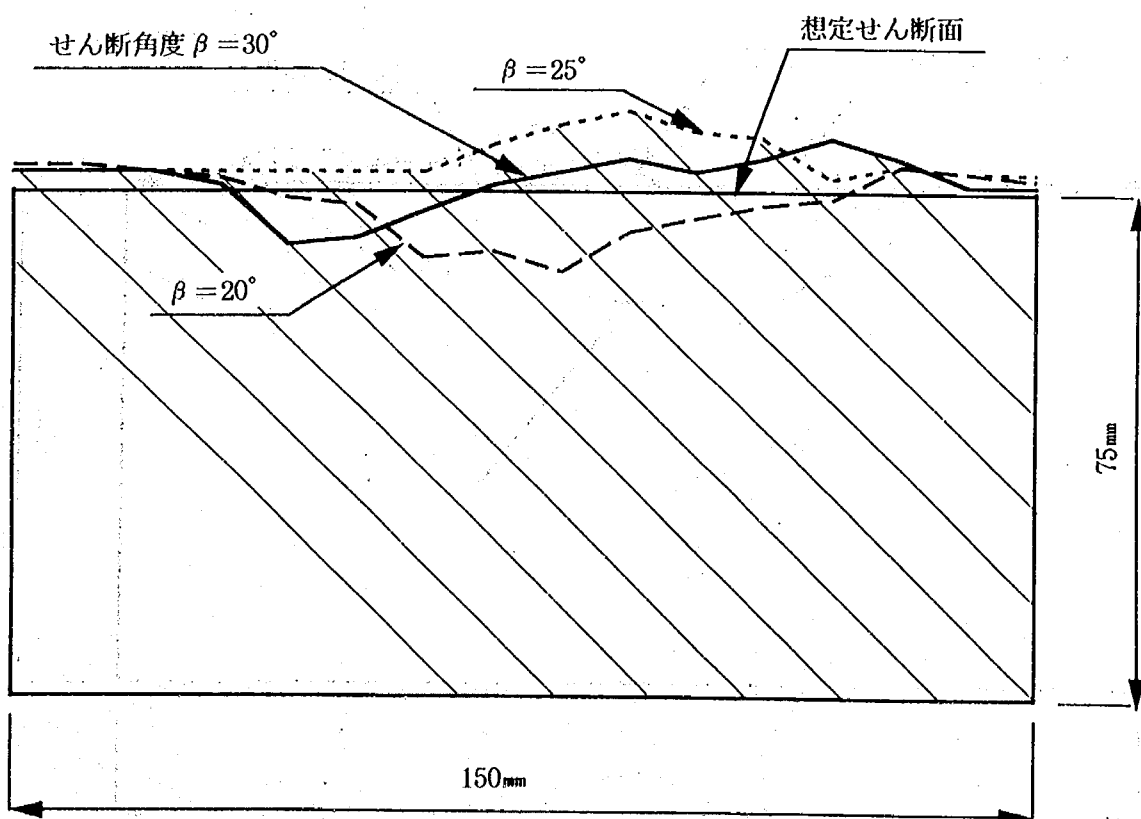


図-4.2.6 破壊面形状（流れ目 45° ）

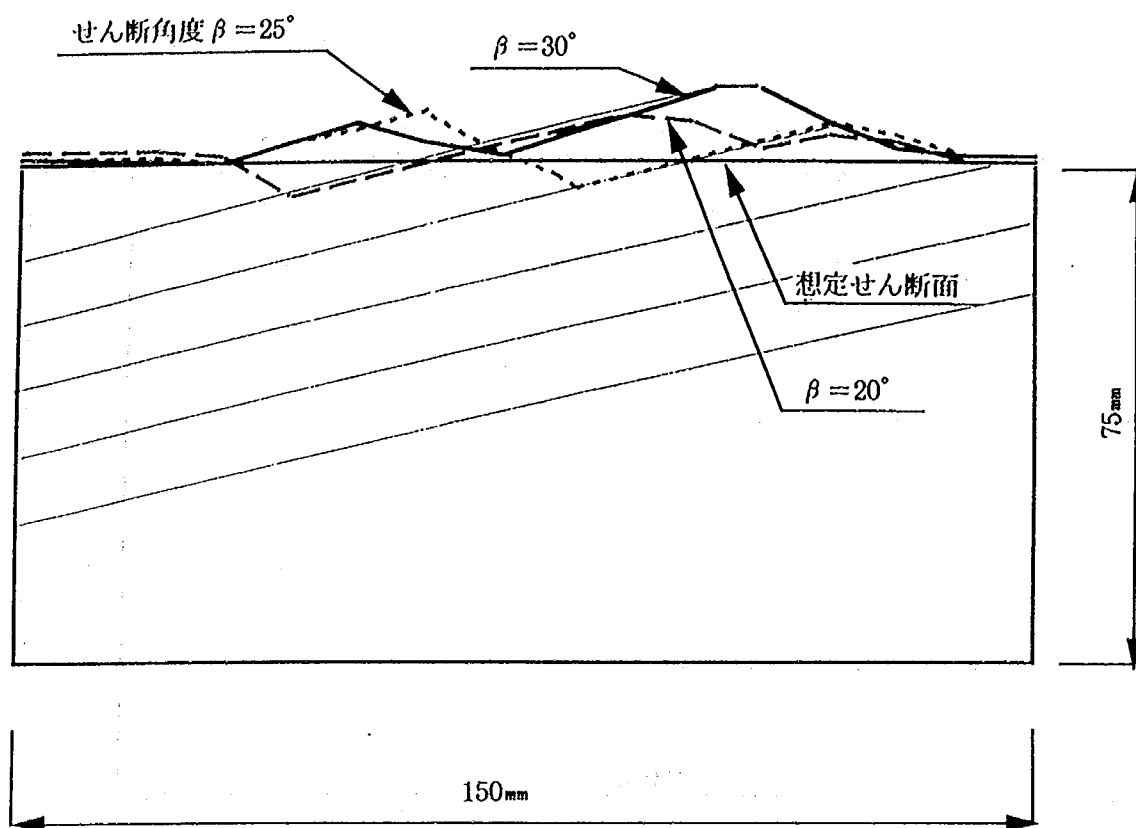


図-4.2.7 破壊面形状 (さし目15°)

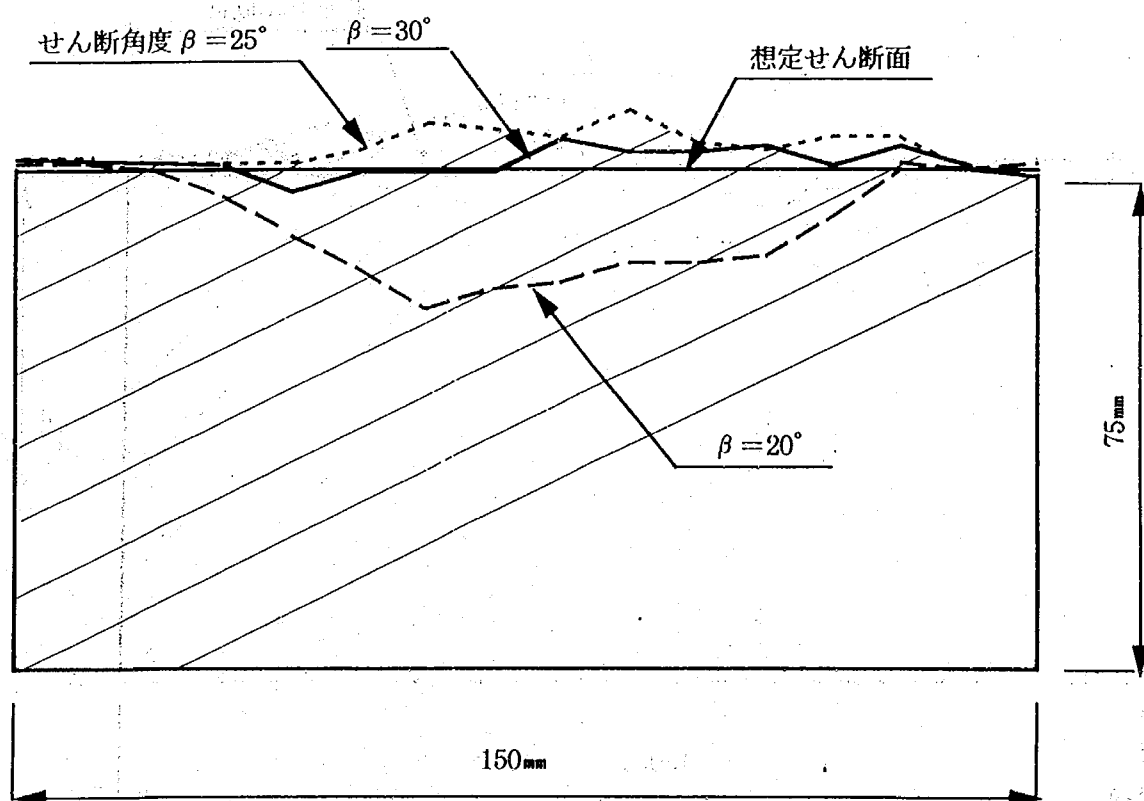


図-4.2.8 破壊面形状 (さし目25°)

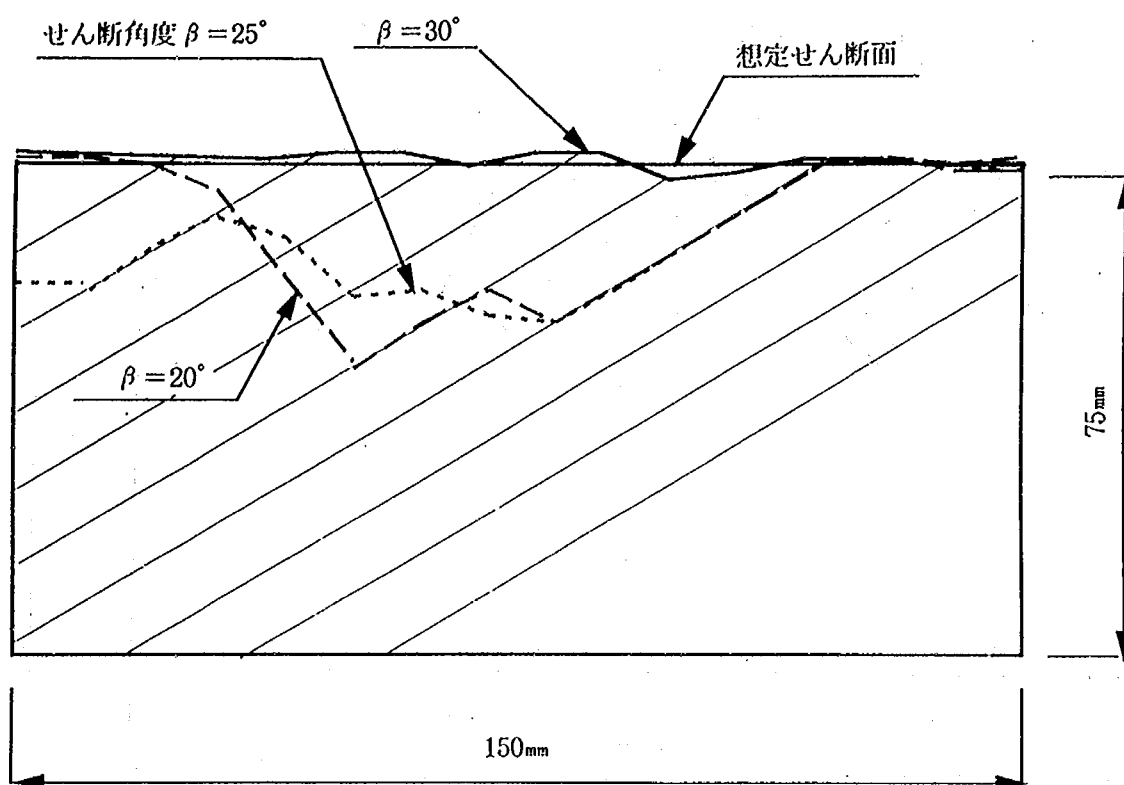


図-4.2.9 破壊面形状 (さし目30°)

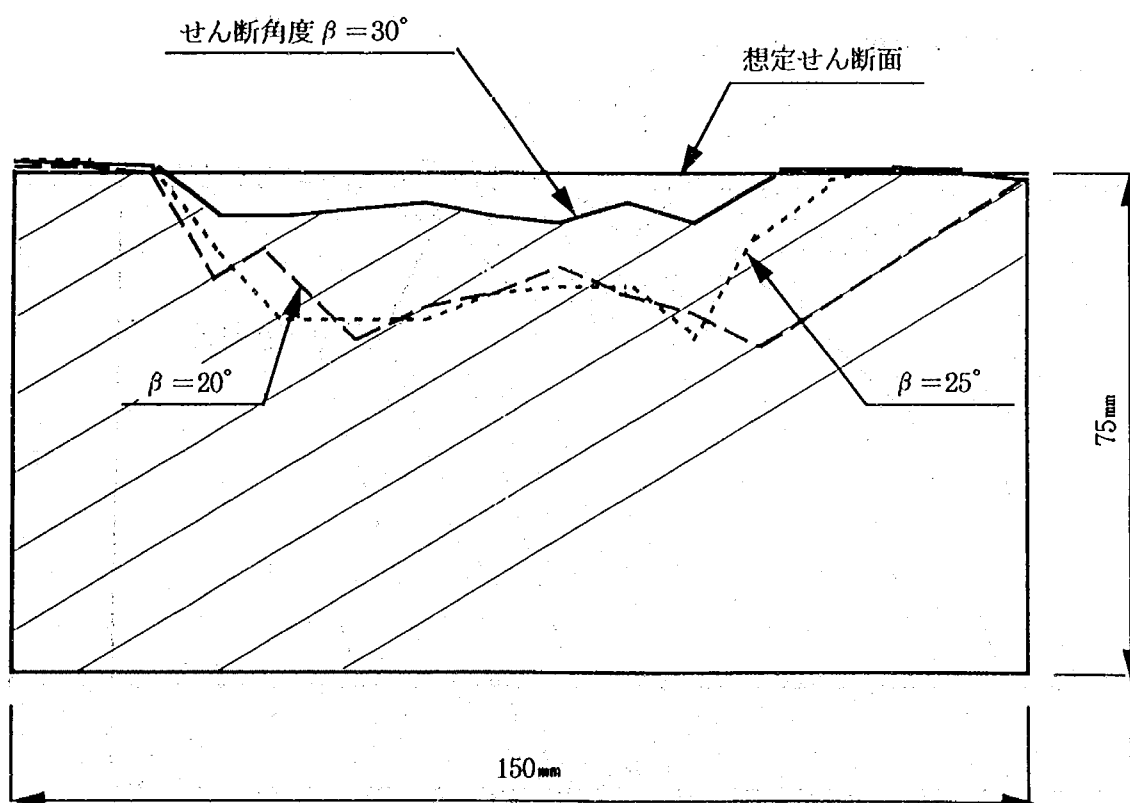


図-4.2.10 破壊面形状 (さし目35°)

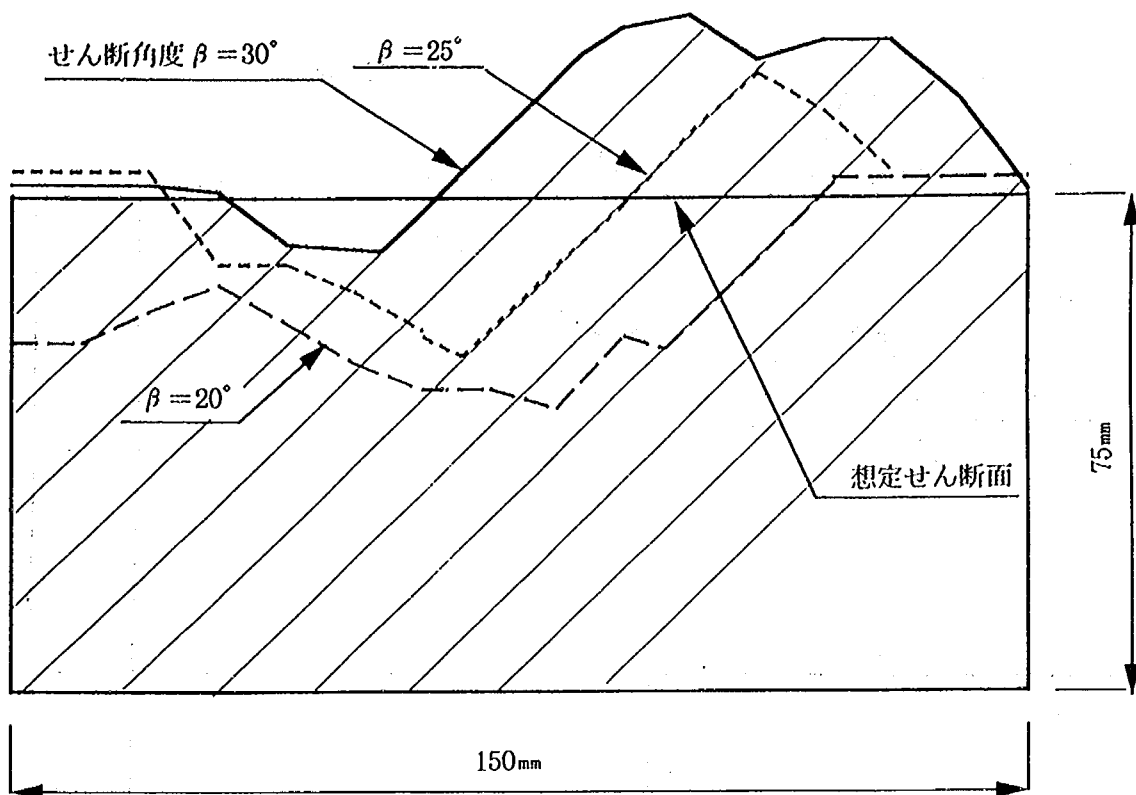


図-4.2.11 破壊面形状（さし目45°）

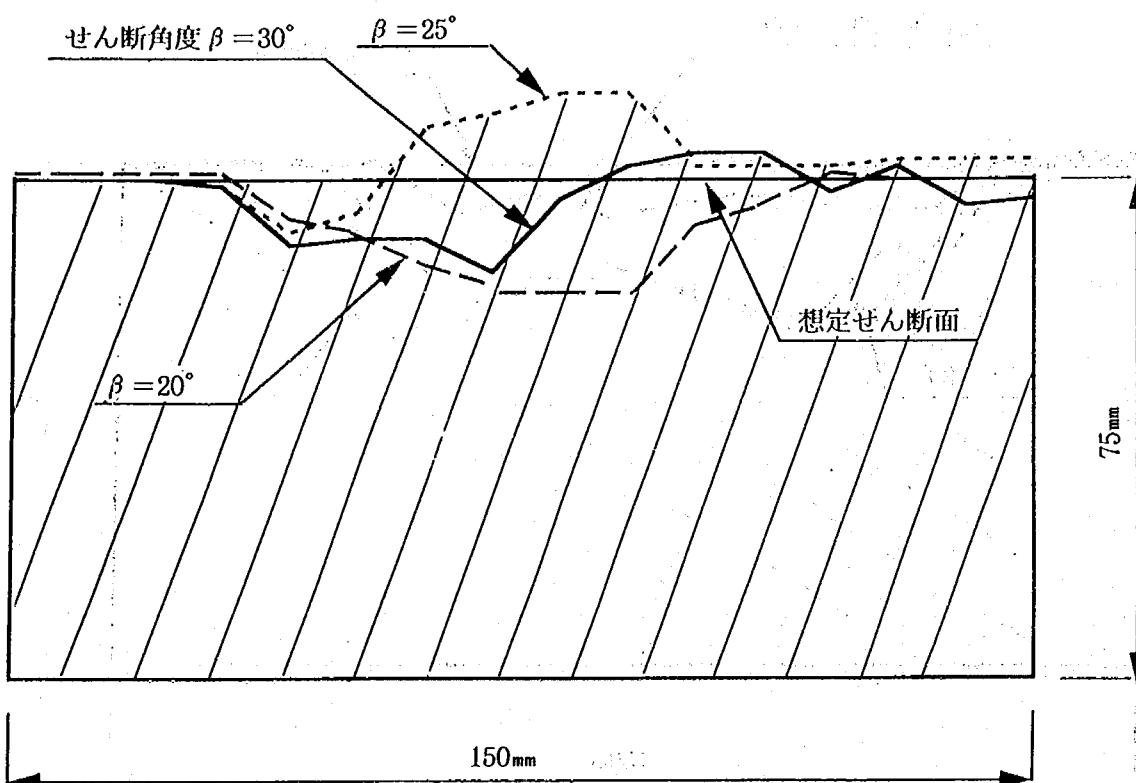


図-4.2.12 破壊面形状（さし目60°）

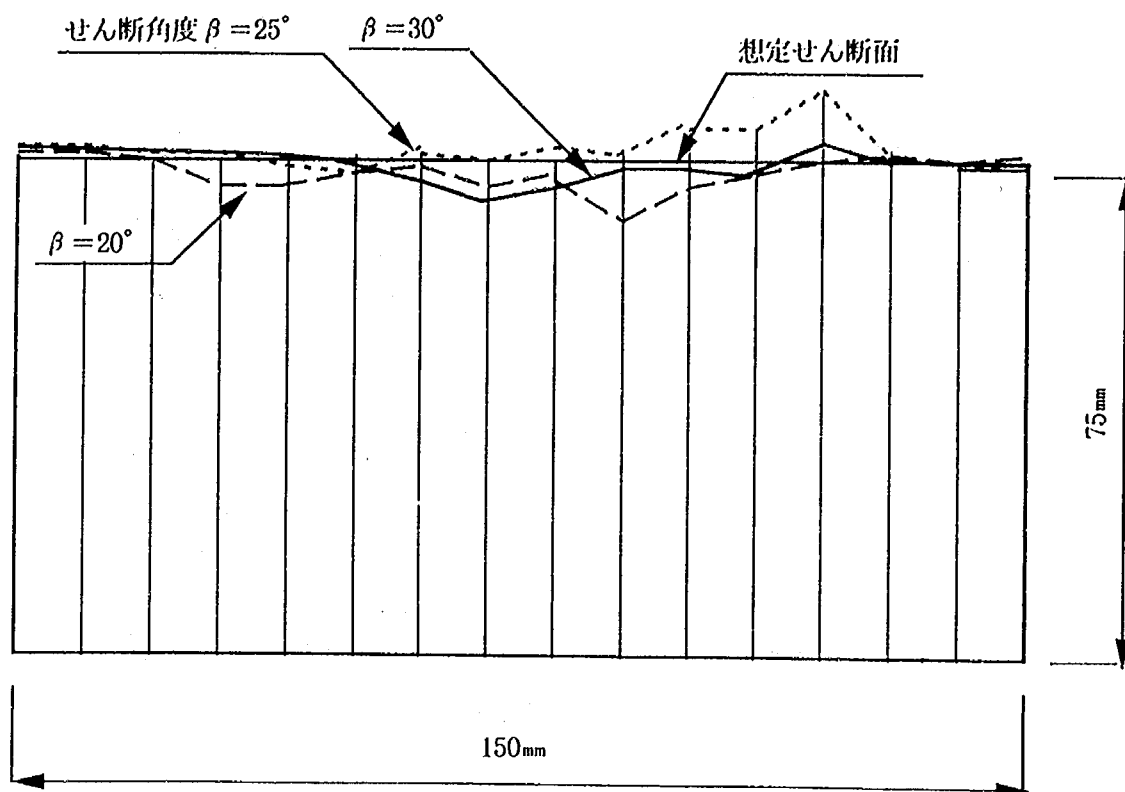


図-4.2.13 破壊面形状（節理の角度 90° ）

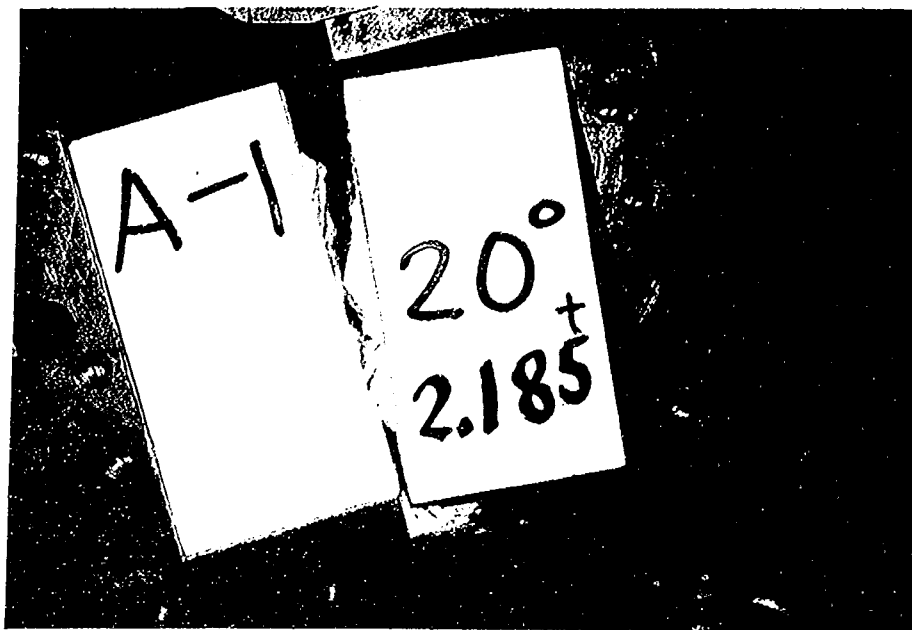


写真-4.2.1 破壊状況（節理なし， $\beta = 20^\circ$ ）

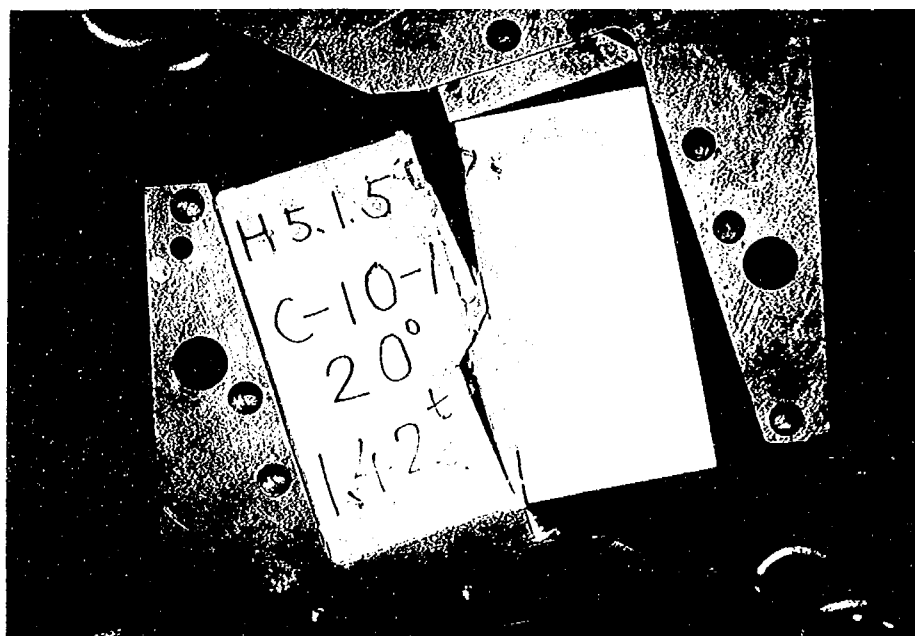


写真-4.2.2 破壊状況（流れ目 10° ， $\beta = 20^\circ$ ）

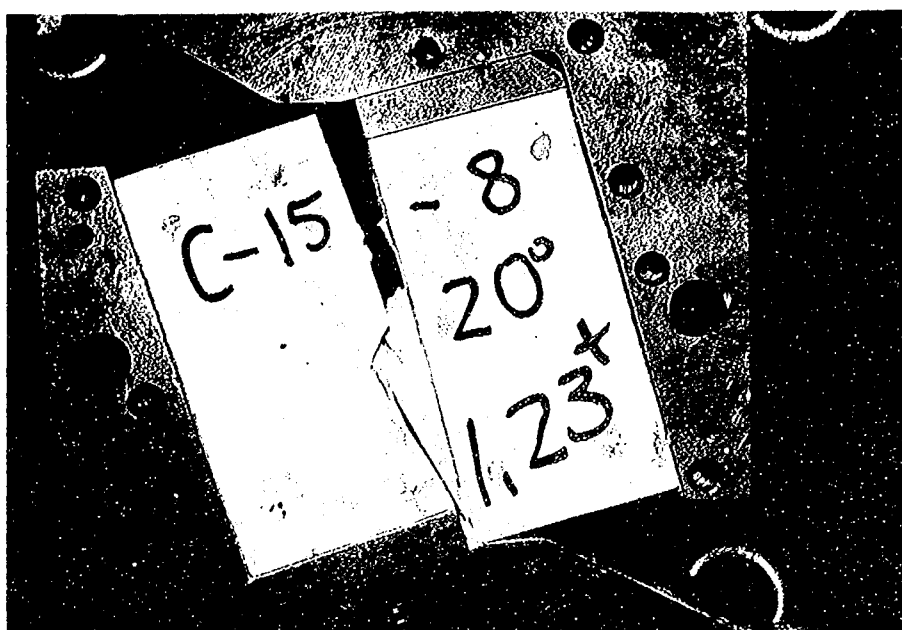


写真-4.2.3 破壊状況（流れ目 15° ， $\beta = 20^\circ$ ）

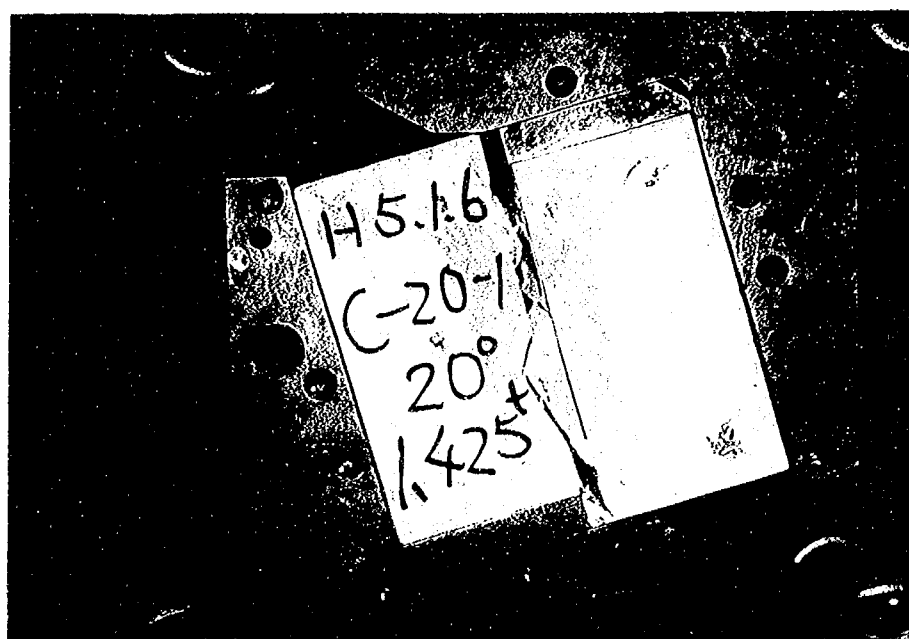


写真-4.2.4 破壊状況（流れ目 20° ， $\beta = 20^\circ$ ）

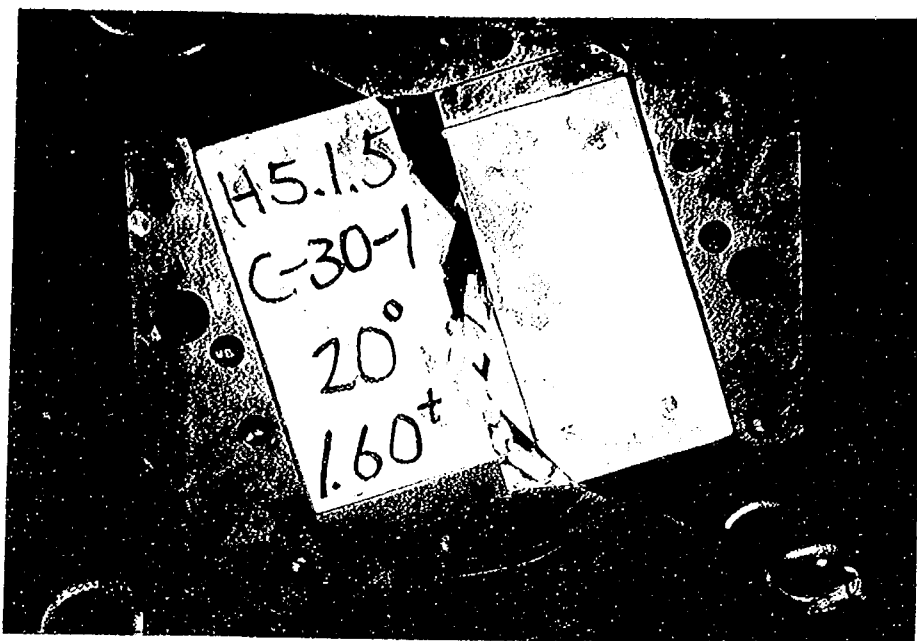


写真-4.2.5 破壊状況（流れ目30°， $\beta = 20^\circ$ ）

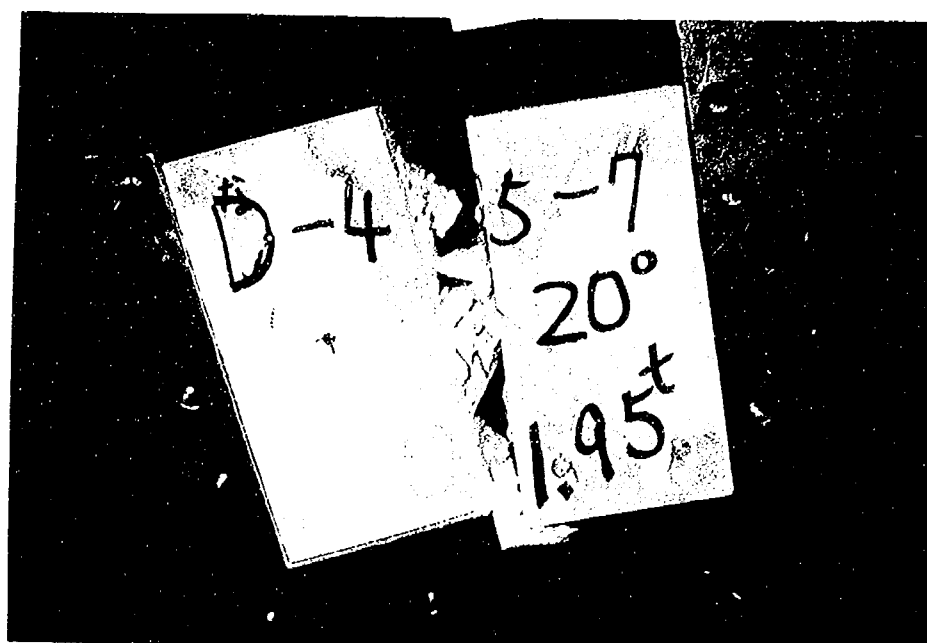


写真-4.2.6 破壊状況（流れ目45°， $\beta = 20^\circ$ ）

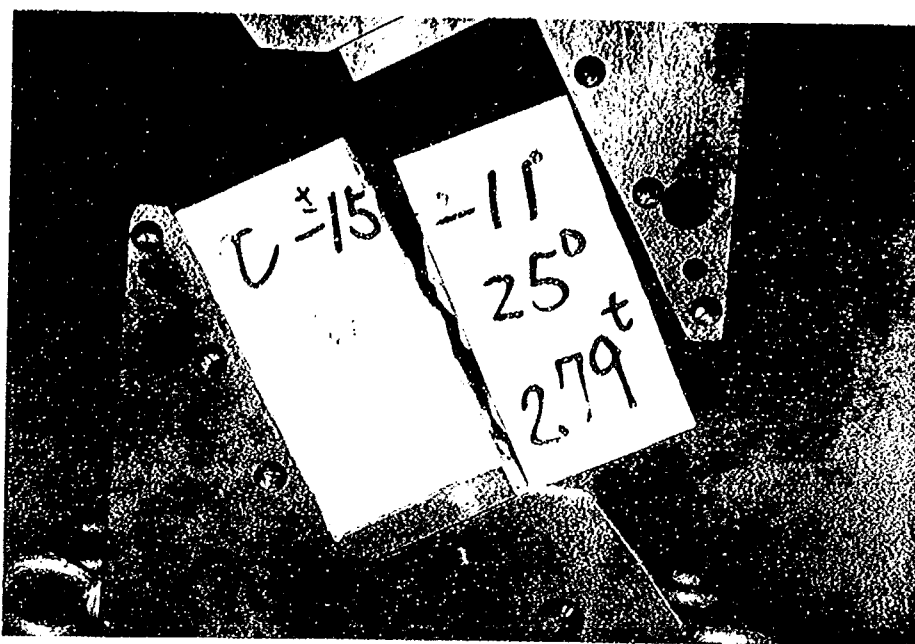


写真-4.2.7 破壊状況（さし目 15° ， $\beta = 25^\circ$ ）

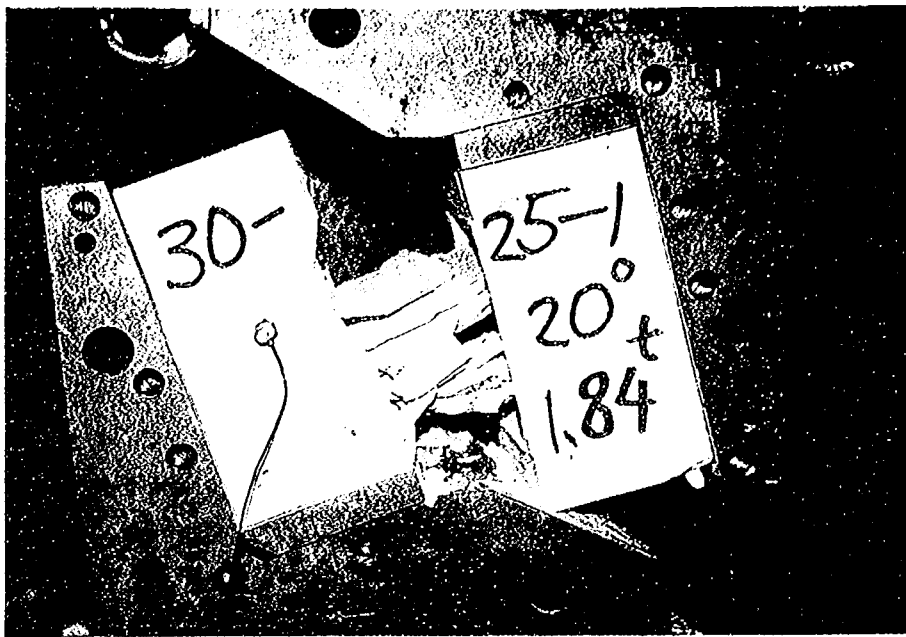


写真-4.2.8 破壊状況（さし目25°， $\beta=20^\circ$ ）

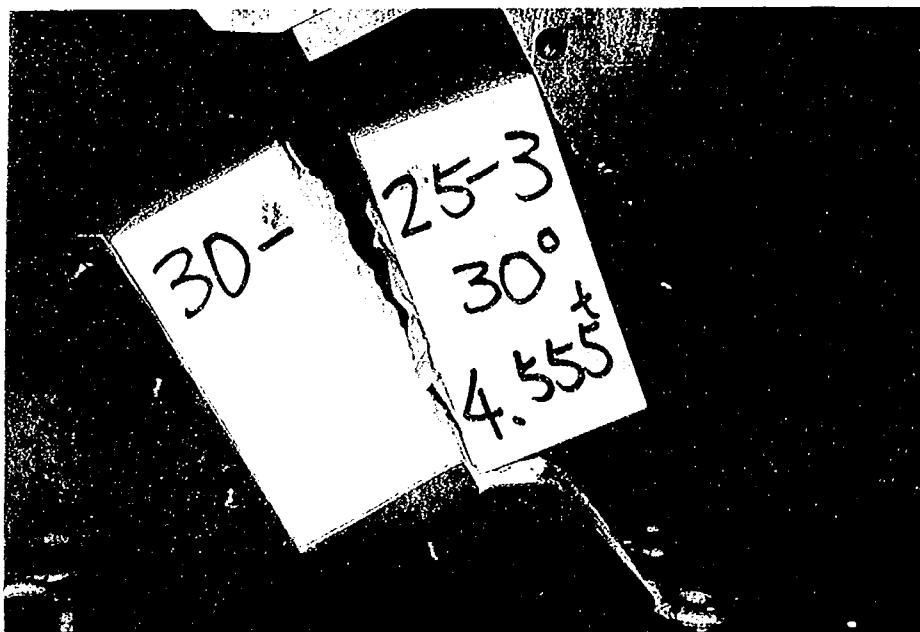


写真-4.2.9 破壊状況（さし目25°， $\beta=30^\circ$ ）

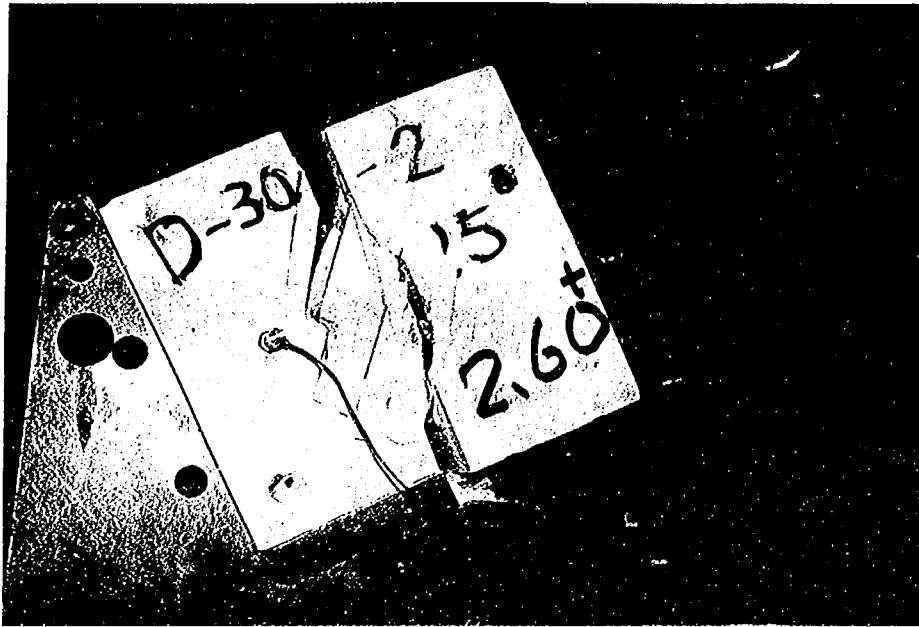


写真-4.2.10 破壊状況（さし目 30° ， $\beta = 25^\circ$ ）

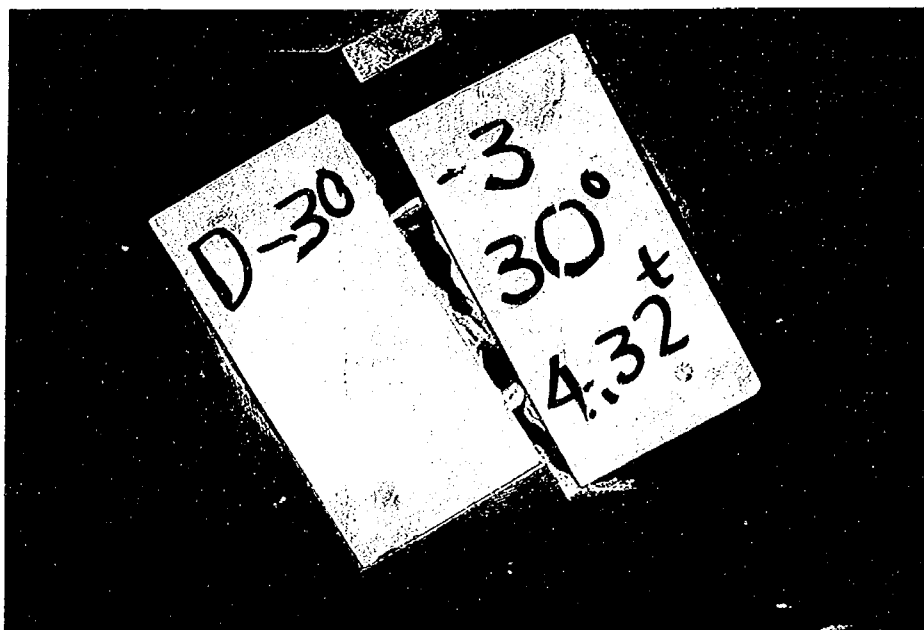


写真-4.2.11 破壊状況（さし目 30° ， $\beta = 30^\circ$ ）

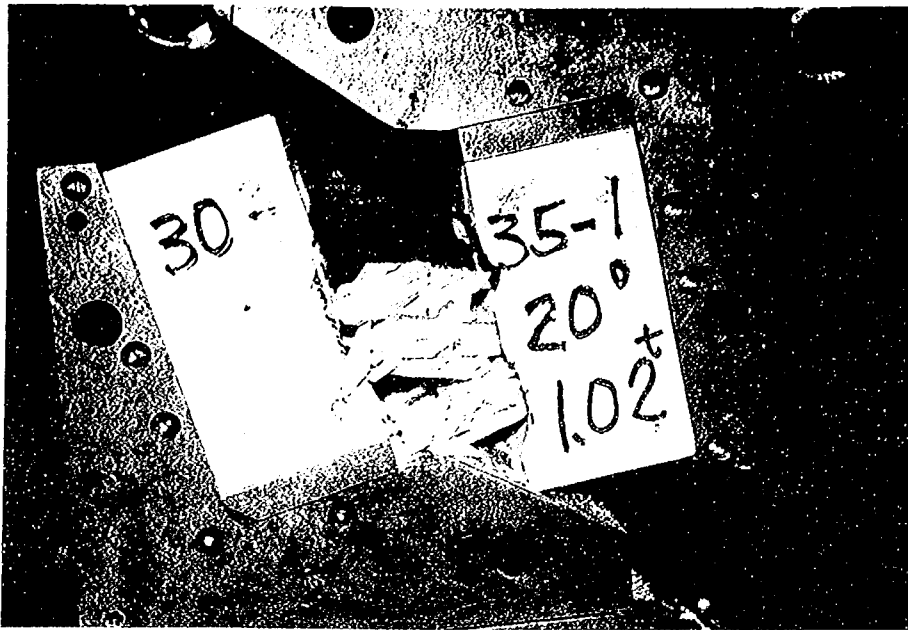


写真-4.2.12 破壊状況（さし目 35° ， $\beta=20^\circ$ ）

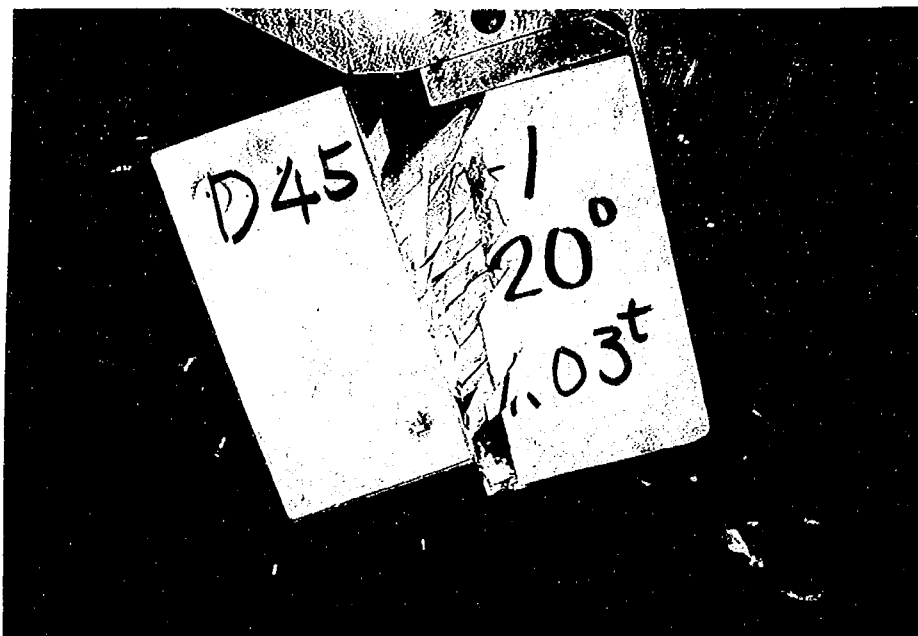


写真-4.2.13 破壊状況（さし目 45° ， $\beta=20^\circ$ ）

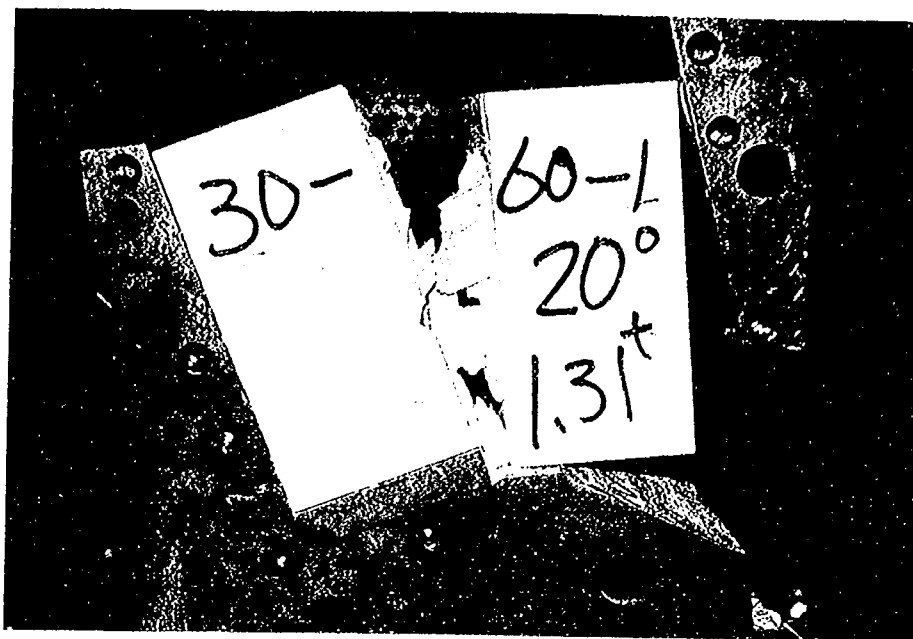


写真-4.2.14 破壊状況（さし目 60° ， $\beta=20^\circ$ ）

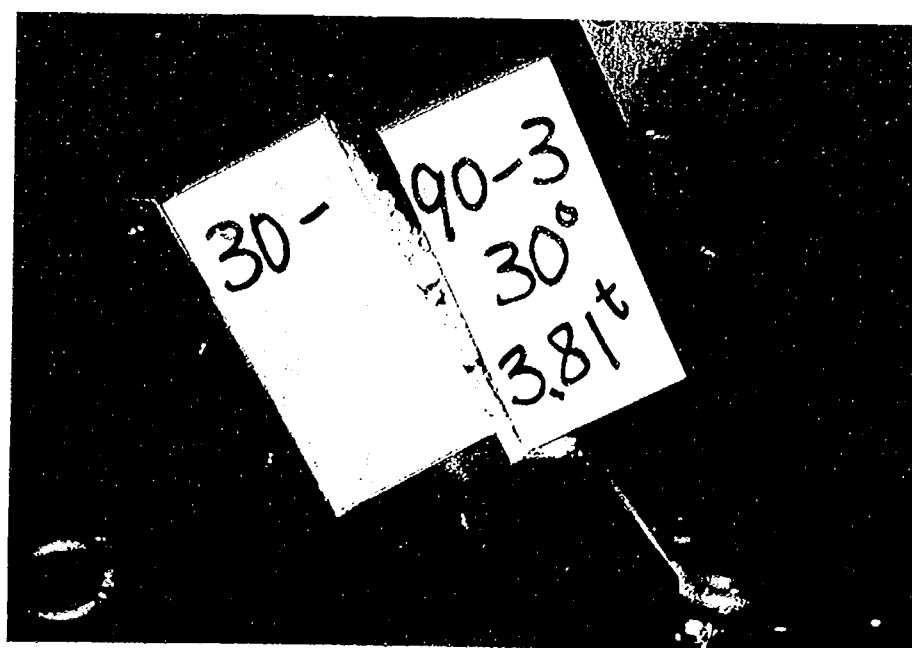


写真-4.2.15 破壊状況（節理の角度 90° ， $\beta=30^\circ$ ）

5.1 節理の角度が岩盤供試体の破壊荷重に及ぼす影響

ケース1（珪藻土の重量混合比30%，ガーゼなし）～ケース3（珪藻土の重量混合比0%，ガーゼあり）における節理の角度 θ と岩盤供試体の破壊荷重 P の関係を図-5.1.1～図-5.1.3に示す。破壊荷重の大きさは各ケース毎に大きく異なるが、節理の角度 θ に対する破壊荷重の増減は概ね同一の傾向を示している。すなわち、流れ目（ $\theta \geq 0^\circ$ ）では、 $\theta = 0^\circ$ で最も破壊荷重が小さく、 θ が大きくなるに従って破壊荷重も徐々に増加し、やがて節理がない場合の破壊荷重とほぼ等しくなる。一方、さし目（ $\theta \leq 0^\circ$ ）では、 $\theta = 0^\circ$ で最も破壊荷重が小さく、 θ の絶対値が大きくなるに従って破壊荷重が急増し、 θ の絶対値がせん断角度 β にほぼ等しく（ $\theta \approx -\beta$ ）なると極大値に達する。これは、節理間の岩片が柱となって抵抗し、強度が大きくなったためである。さらに θ の絶対値が大きくなると破壊荷重は急減して $\theta = -45^\circ$ 付近で極小値に達する。これは、節理の方向が荷重の方向より急勾配になり、節理の開口に起因した曲げ破壊が発生するためである。 θ の絶対値がさらに大きくなると破壊荷重は徐々に大きくなり、やがて節理がない場合の破壊荷重とほぼ等しくなる。

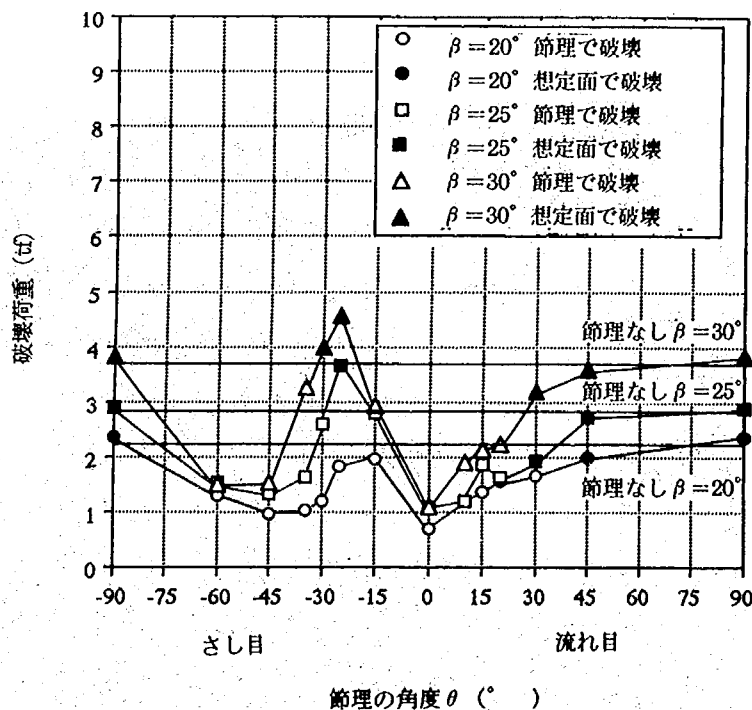


図-5.1.1 節理の角度 θ に対する破壊荷重の変化（ケース1，D/P=30%，ガーゼなし）

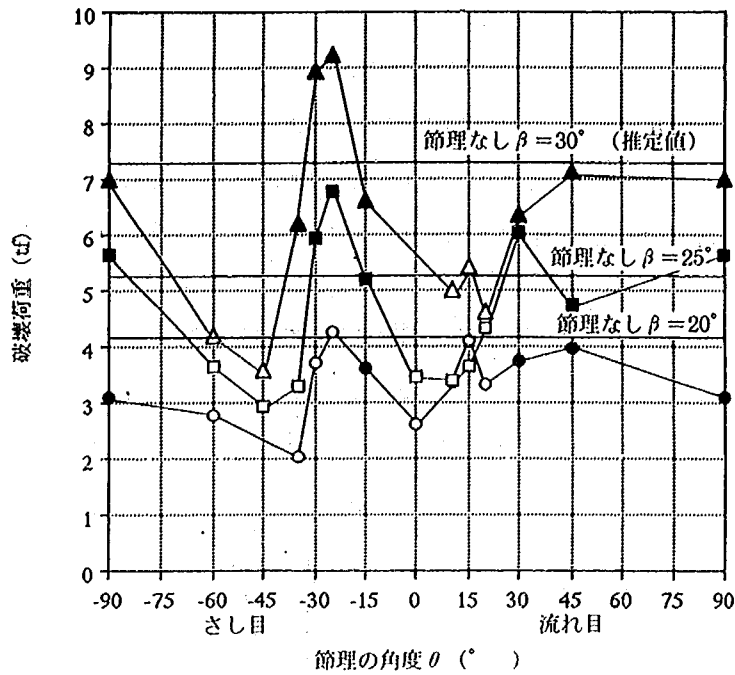


図-5.1.2 節理の角度 θ に対する破壊荷重の変化 (ケース 2, $D/P=0\%$, ガーゼなし)

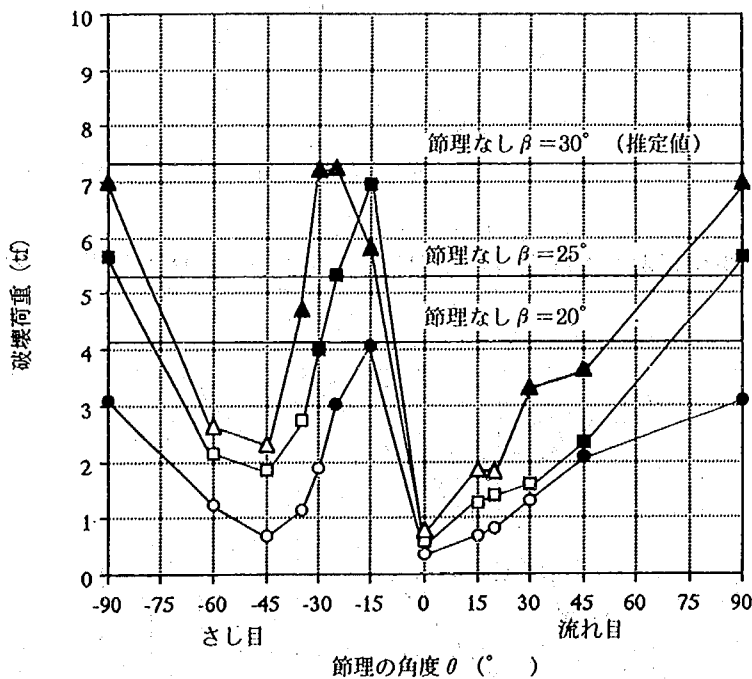


図-5.1.3 節理の角度 θ に対する破壊荷重の変化 (ケース 3, $D/P=0\%$, ガーゼあり)

5.2 節理の角度とせん断破壊規準の関係

ケース 1～ケース 3 のせん断試験結果から想定せん断面におけるせん断破壊時の垂直応力とせん断応力の関係を求めた結果を図-5.2.1～図-5.2.3に示す。また、各ケースについて節理の角度 θ と純せん断強度 τ_0 および内部摩擦係数 f の関係を求めた結果を図-5.2.4～図-5.2.6に示す。試験値のバラツキは大きく、特に岩片のせん断強度と節理のせん断強度の差が小さいケース 2 では試験値のバラツキに隠れて明瞭な傾向は現れていないが、全体として次のような傾向がある。

- ①流れ目 ($\theta \geq 0^\circ$) では、節理の角度 θ が増加すると純せん断強度 τ_0 が増加する。
- ②さし目 ($\theta \leq 0^\circ$) では、 $-25^\circ < \theta < -15^\circ$ では岩片が柱となって抵抗するため、純せん断強度 τ_0 は極大値を示すが、 $-45^\circ < \theta < -35^\circ$ では節理の開口に起因した曲げ破壊が生じるため、純せん断強度 τ_0 極小値をとる。また、 $\theta < -45^\circ$ では θ の絶対値の増加とともに純せん断強度 τ_0 は増加する。
- ③内部摩擦係数 f のバラツキは大きいが、節理の角度 $\theta = -30^\circ$ 付近で比較的大きい値を示す。

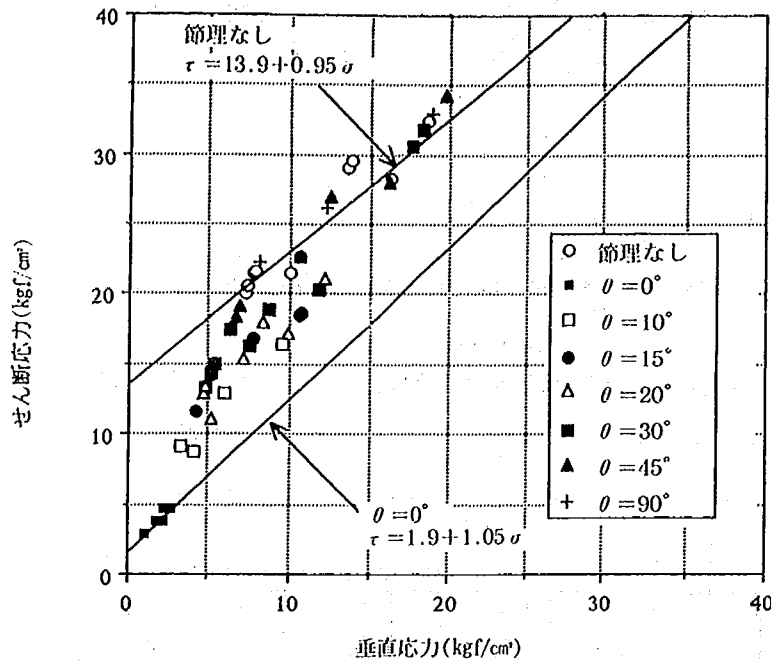


図-5.2.1(1) せん断破壊規準に対する節理の角度の影響 (ケース1, D/P=30%, ガーゼなし, 流れ目)

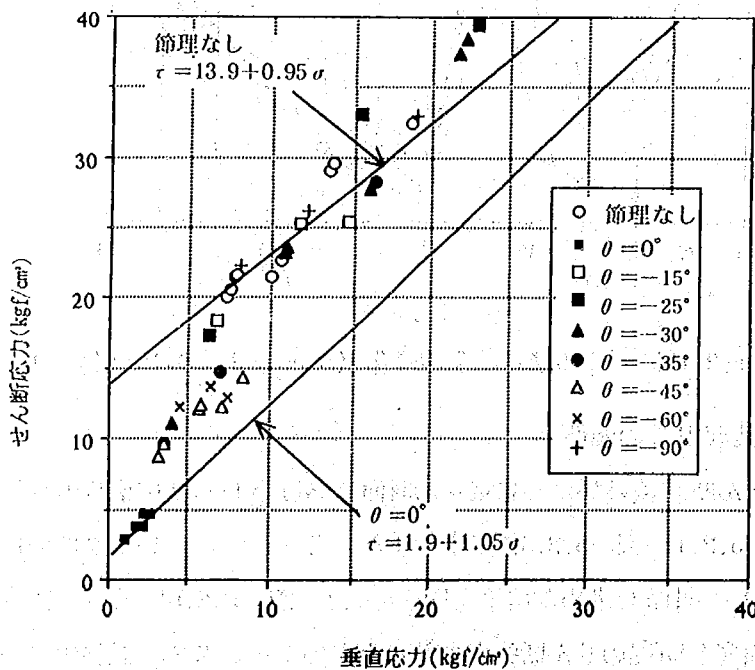


図-5.2.1(2) せん断破壊規準に対する節理の角度の影響 (ケース1, D/P=30%, ガーゼなし, さし目)

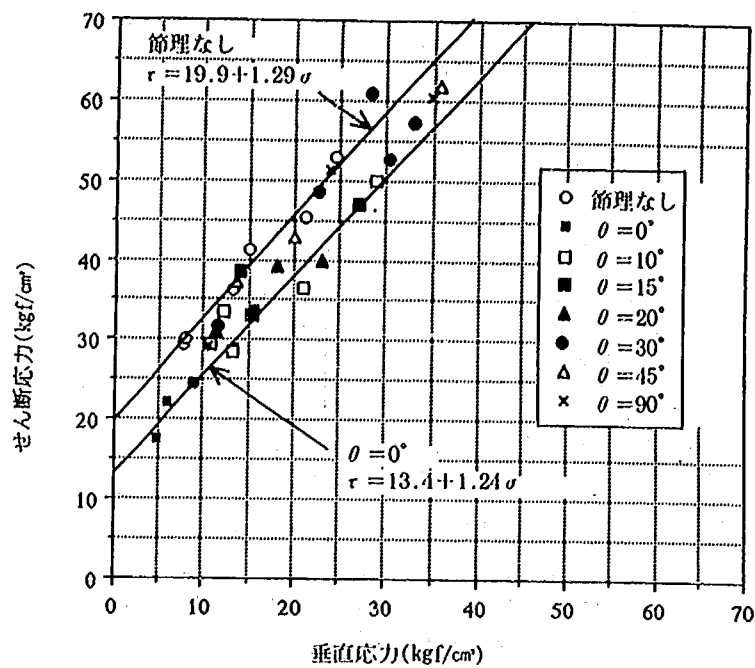


図-5.2.2(1) せん断破壊規準に対する節理の角度の影響 (ケース2, D/P=0%, ガーゼなし, 流れ目)

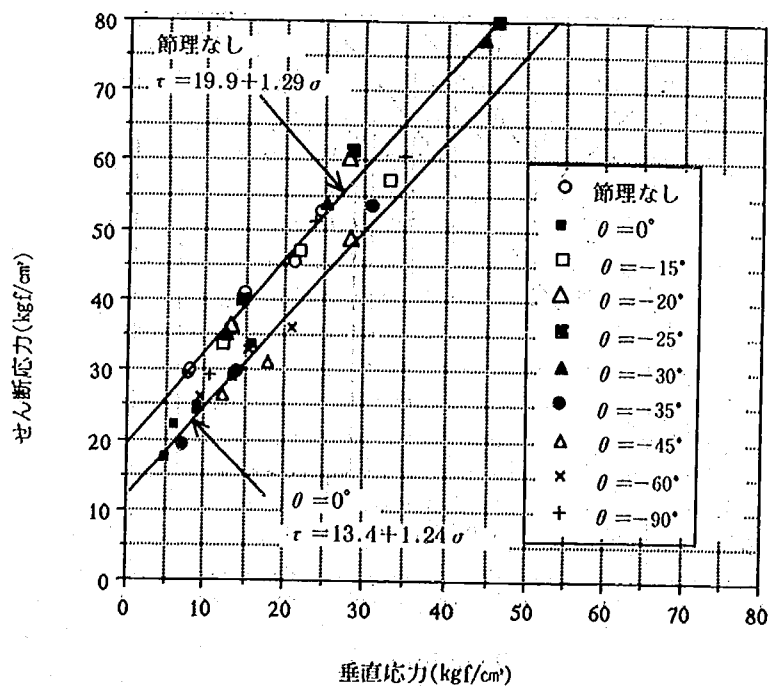


図-5.2.2(2) せん断破壊規準に対する節理の角度の影響 (ケース2, D/P=0%, ガーゼなし, さし目)

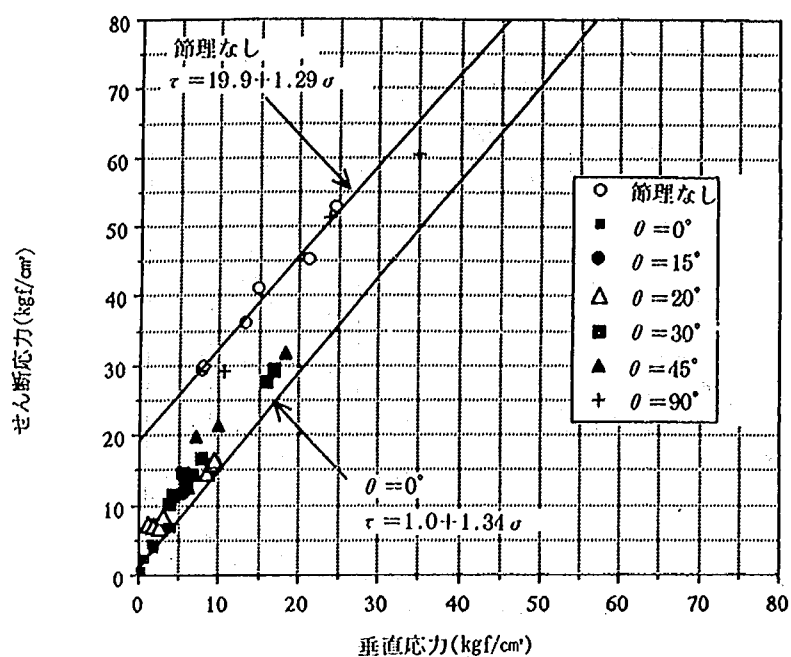


図-5.2.3(1) せん断破壊規準に対する節理の角度の影響 (ケース 3, D/P=0%, ガーゼあり, 流れ目)

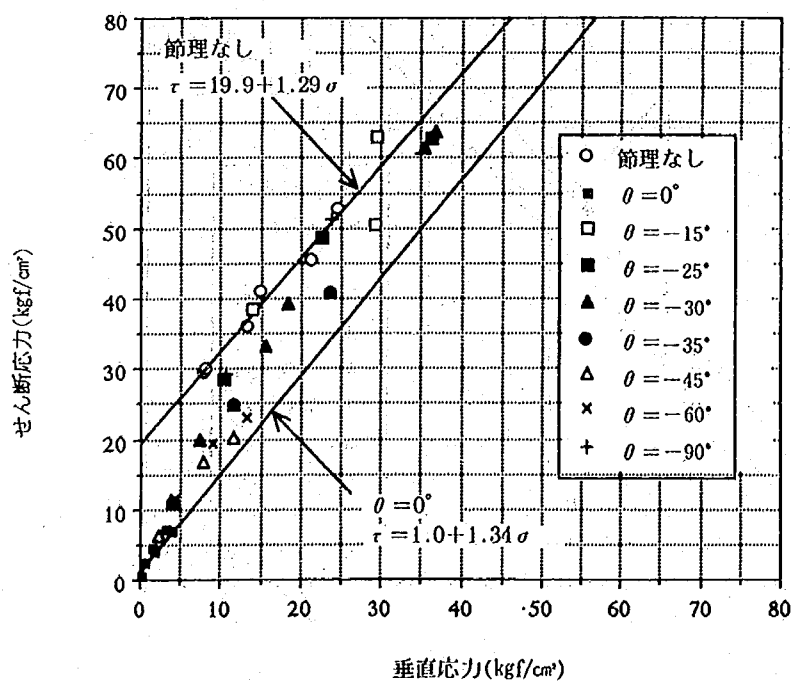


図-5.2.3(2) せん断破壊規準に対する節理の角度の影響 (ケース 3, D/P=0%, ガーゼあり, さし目)

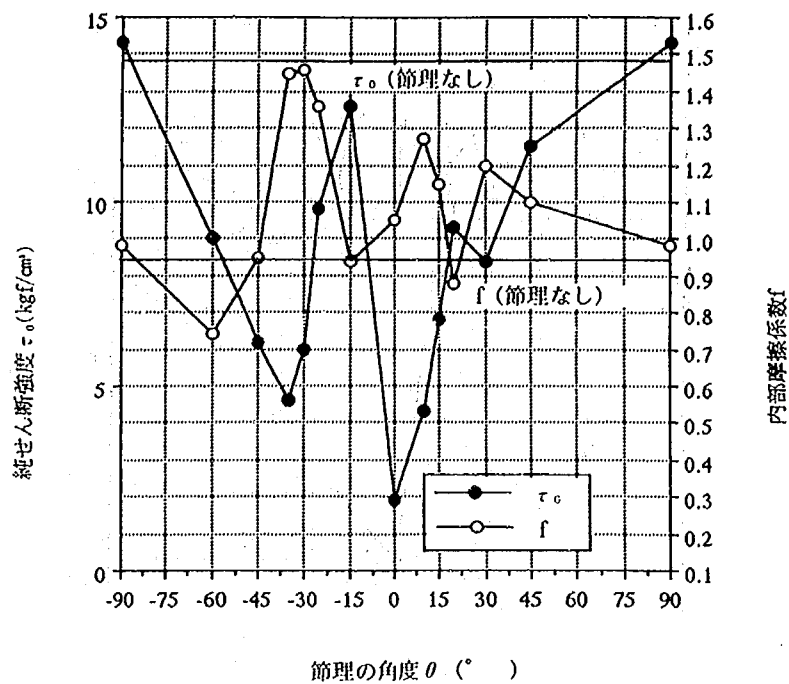


図-5.2.4 節理の角度 θ と純せん断強度 τ_0 および内部摩擦係数 f の関係
(ケース 1, $D/P=30\%$, ガーゼなし)

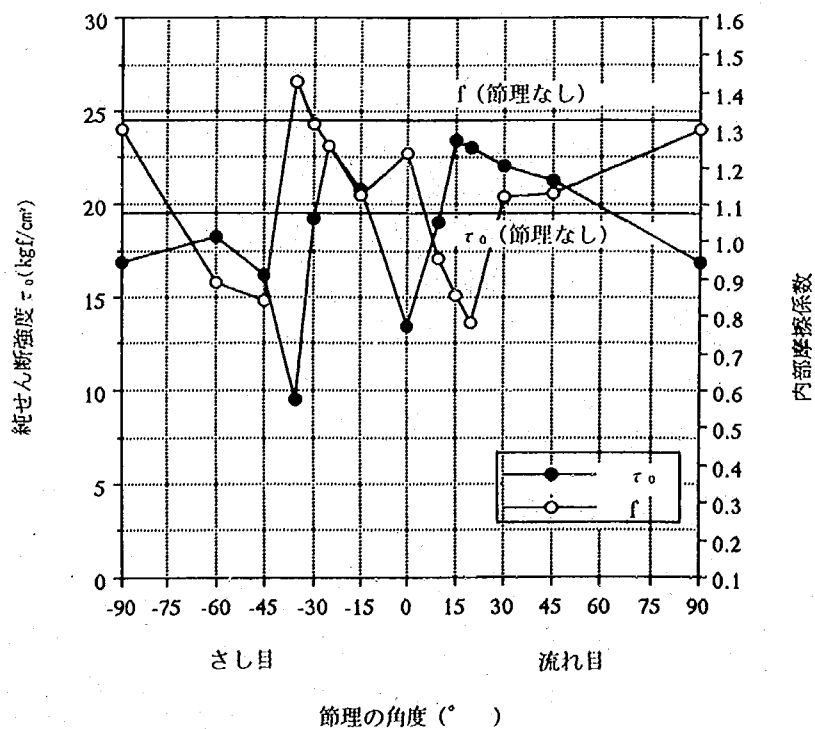


図-5.2.5 節理の角度 θ と純せん断強度 τ_0 および内部摩擦係数 f の関係
(ケース 2, $D/P=0\%$, ガーゼなし)

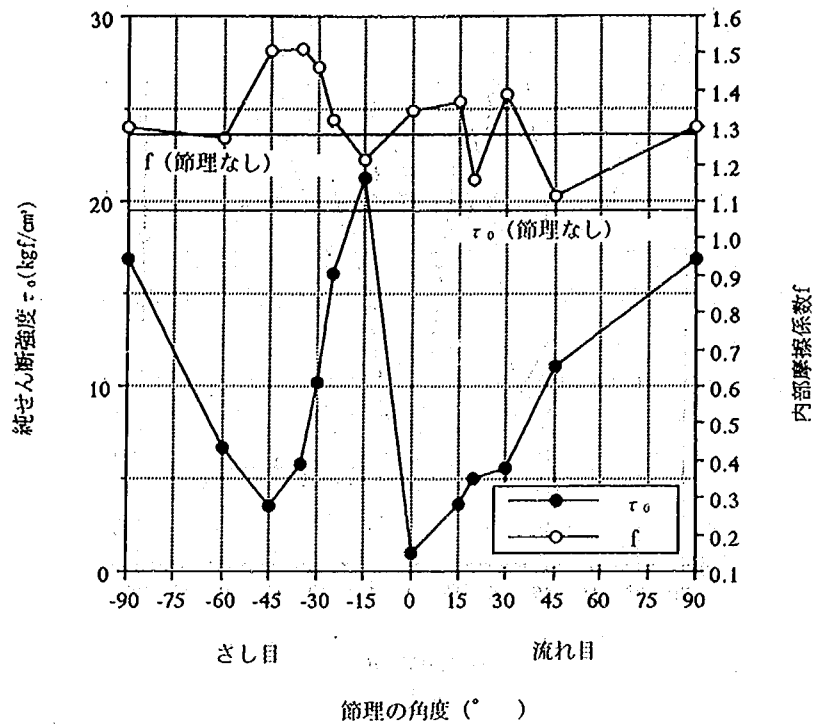


図-5.2.6 節理の角度 θ と純せん断強度 τ_0 および内部摩擦係数 f の関係
(ケース 3, $D/P=0\%$, ガーゼあり)

ここで、今回のせん断試験結果のバラツキ（特に内部摩擦係数）の原因について考察する。試験結果のバラツキとしては、単に試験誤差によるものと後述するように節理の角度 θ とせん断角度 β の関係に起因した破壊荷重の非線形性によるものとの2つが考えられるが、ここではその影響の大小について検討する。

（1）節理の角度 θ とせん断角度 β の関係に起因した破壊荷重の非線形性の影響

ケース1～ケース3のせん断試験結果（図-5.1.1～図-5.1.3）に見られるように、節理の角度 θ と破壊荷重 P の関係は概念的に図-5.2.7のようなパイリニアモデルで表わされると考えられる。この場合、節理の角度 θ の大きさとせん断角度 β の値によって岩盤の破壊は次の5通りの状況に分類される。各々の状況における破壊時の応力状態を図-5.2.8に示すが、以下それぞれの状況について詳述する。

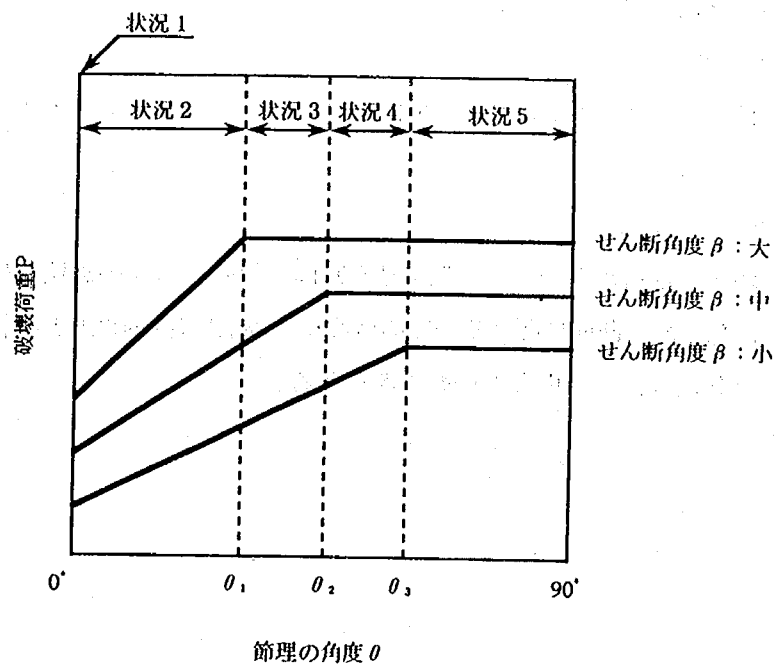


図-5.2.7 節理の角度 θ と破壊荷重 P の関係の概念図

①状況1 ($\theta = 0^\circ$)

想定せん断面と節理面が一致しているため、破壊は節理面で生じる。このため、図-5.2.8(1)に示すように、想定せん断面に関する岩盤の破壊規準線は節理面の破壊規準線と完全に一致する。

②状況2 ($0^\circ \leq \theta \leq \theta_1$)

図-5.2.8(2)に示すように、せん断角度 β の大きさにかかわらず、節理面に沿った破壊が発生するが、節理の角度 θ が増加するに従って節理の方向と荷重の作用方向のなす角も増加するため、想定せん断面に関する破壊時の応力は節理の角度 θ の増加に伴って徐々に増加する。なお、見かけの内部摩擦係数は状況1の場合よりも大きくなる。

③状況3 ($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$)

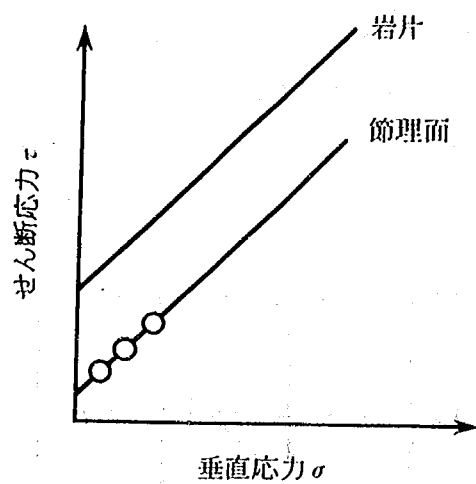
図-5.2.8(3)に示すように、せん断角度 β の大きさによって節理の影響が異なり、 β が小さい場合は節理に沿った破壊が発生し、 β が大きい場合は想定せん断面に沿って岩片の破壊が発生する領域である。せん断角度 β が小さく、破壊荷重が小さい場合には状況2と同等の線上にプロットされるが、せん断角度 β が大きくなると岩片の破壊規準線上にプロットされるようになる。このため、想定せん断面に関する破壊規準は非線形となり、これを直線近似するとバラツキが大きくなる。また、見かけの内部摩擦係数は状況2の場合よりも小さくなる。

④状況4 ($\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3$)

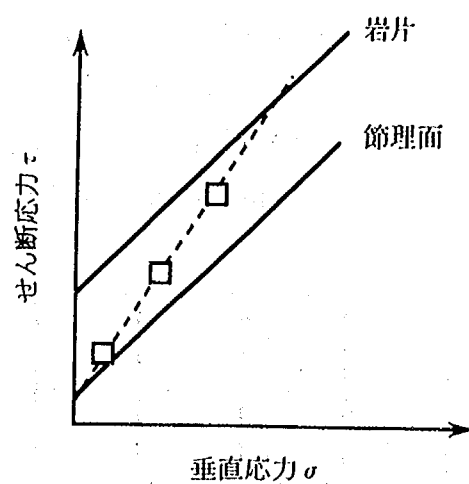
状況3と基本的には同様であるが、図-5.2.8(4)に示すようにせん断角度 β が小さい場合のみ節理に沿った破壊が生じる。

⑤状況5 ($\theta_3 \leq \theta$)

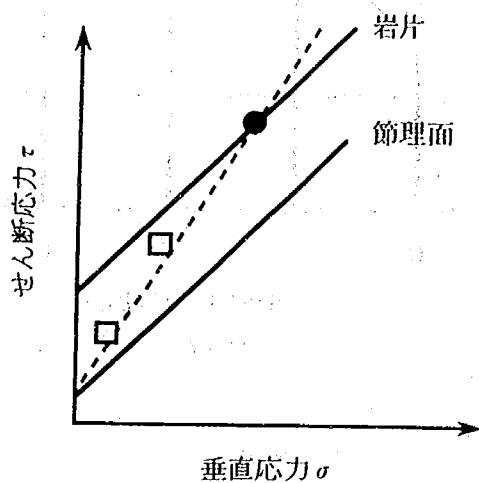
せん断角度 β の大きさにかかわらず、想定せん断面に沿って岩片の破壊が生じるため、図-5.2.8(5)に示すように、想定せん断面に関する岩盤の破壊規準線は岩片の破壊規準線と完全に一致する。なお、内部摩擦係数は状況3、4の場合よりも小さくなる。



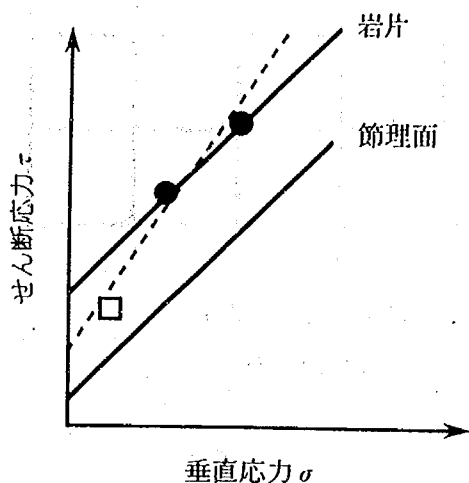
(1) 状況 1



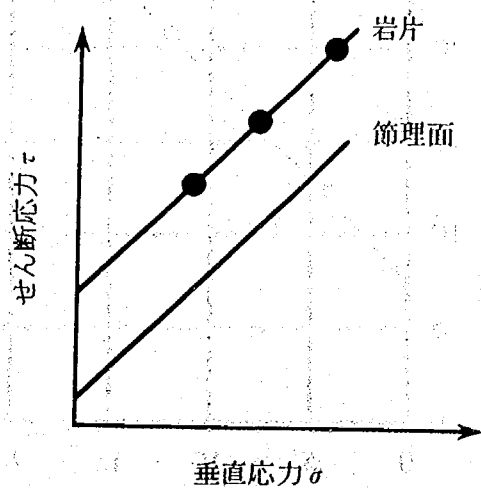
(2) 状況 2



(3) 状況 3



(4) 状況 4



(5) 状況 5

図-5.2.8 節理の角度の変化に伴う破壊規準の変化

以上の考察に対して、ケース1～ケース3について、岩盤の破壊荷重を図-5.2.7に示すようにパイリニヤモデルで回帰し、この回帰線をもとに想定せん断面に関する破壊時応力を求めると図-5.2.9～図-5.2.11のようになる。図では、これらの点を直線で回帰した場合の回帰線を併せて示しているが、今回の試験結果に関しては前述した状況1～状況5の影響は顕著に現れていない。したがって、今回の試験に関しては、節理の角度 θ とせん断角度 β の関係に起因した非線形性は強く現れていないと考えられる。

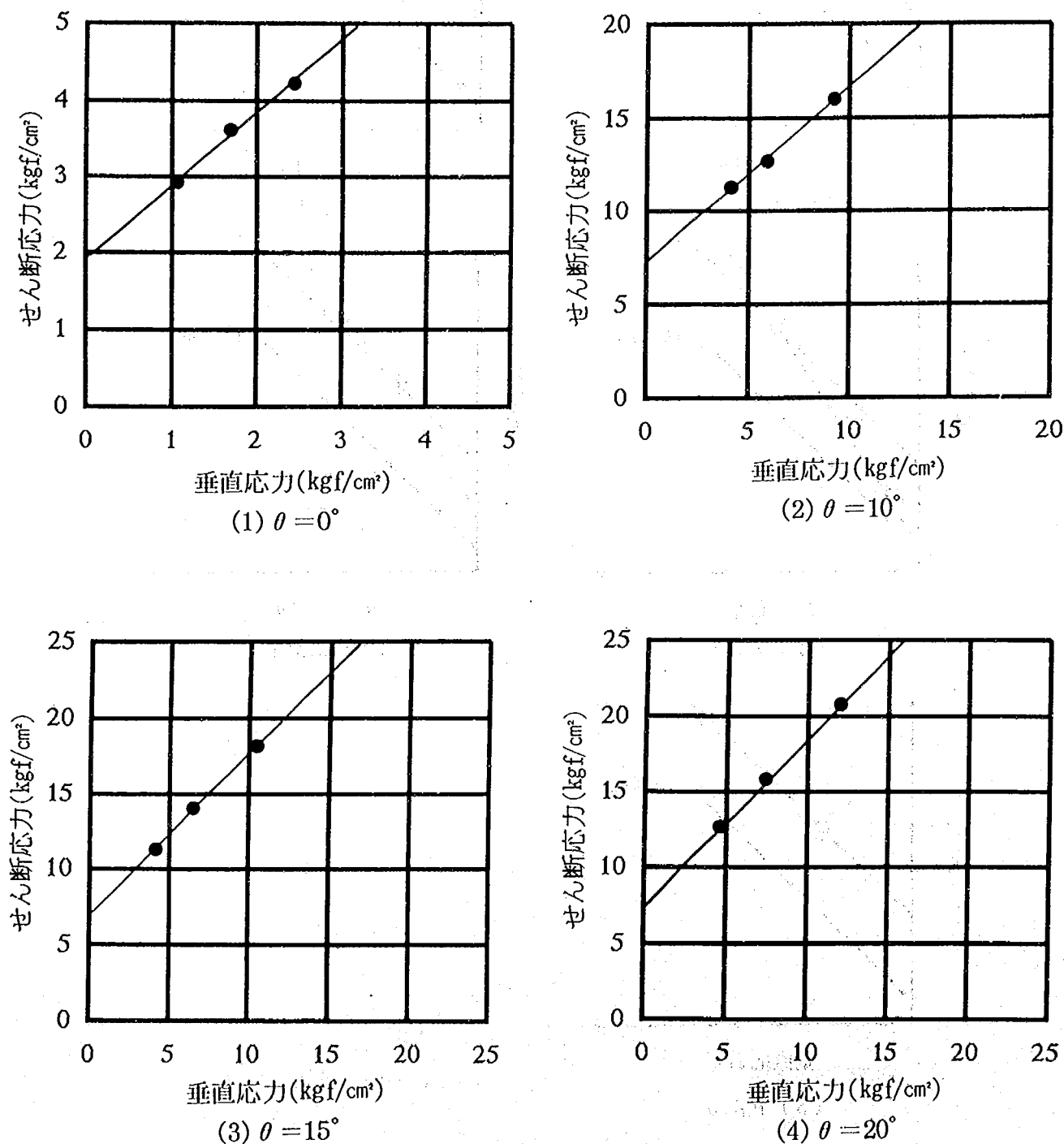


図-5.2.9 破壊荷重モデルから求めた破壊時応力（ケース1，その1）

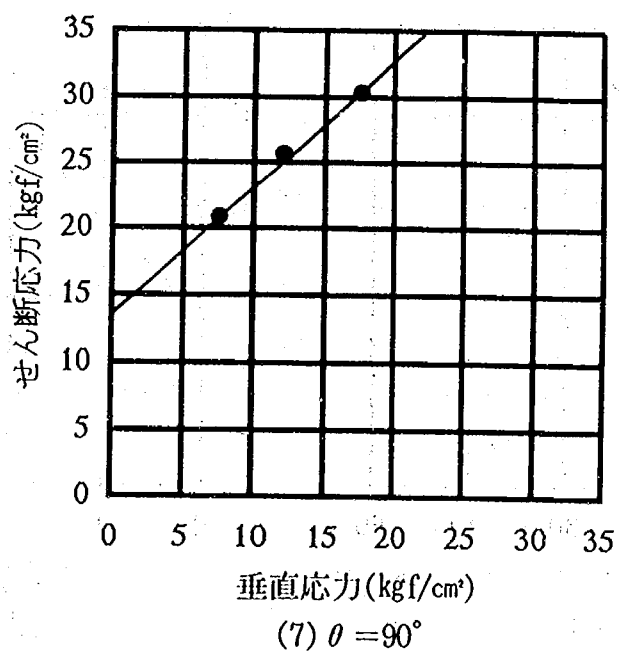
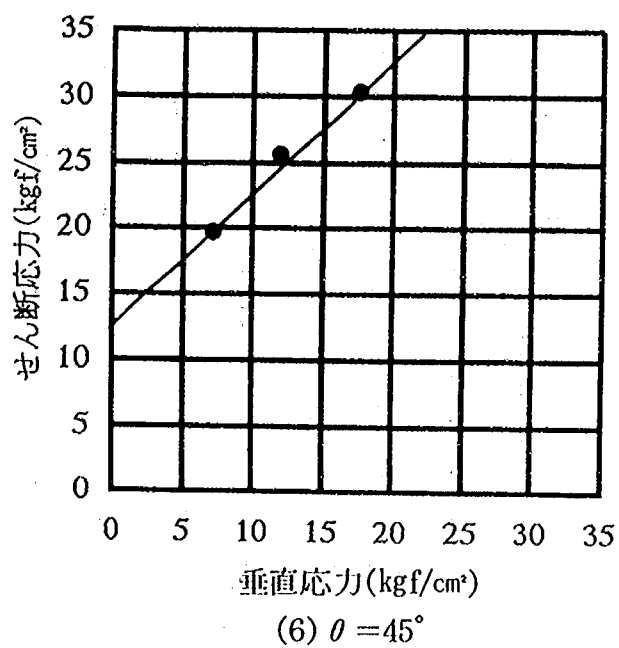
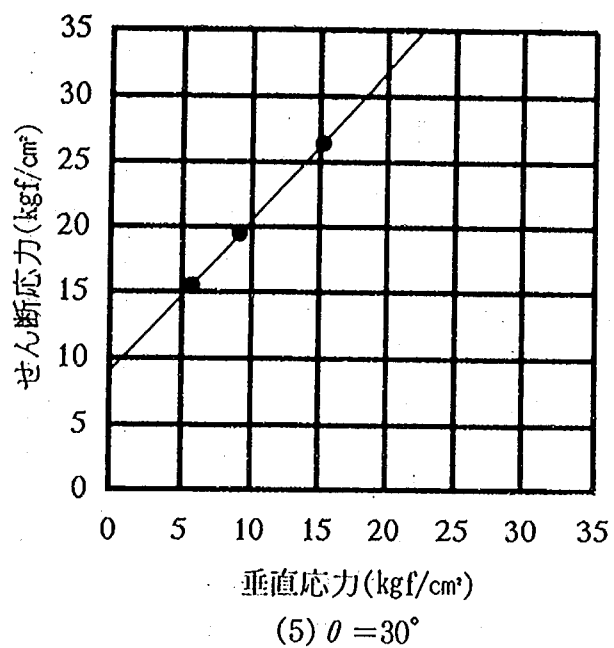


図-5.2.9 破壊荷重モデルから求めた破壊時応力 (ケース1, その2)

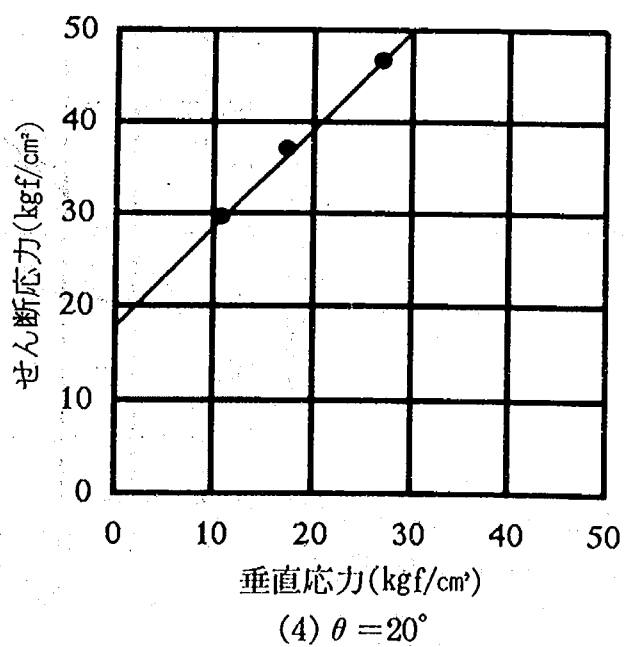
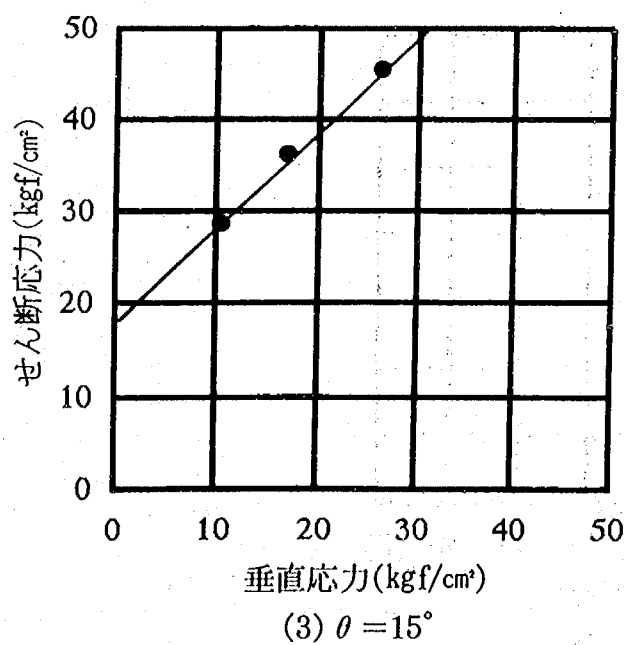
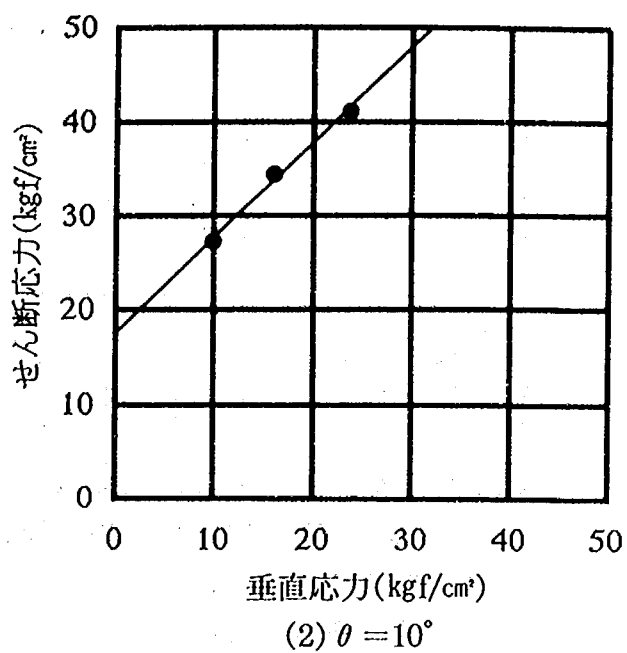
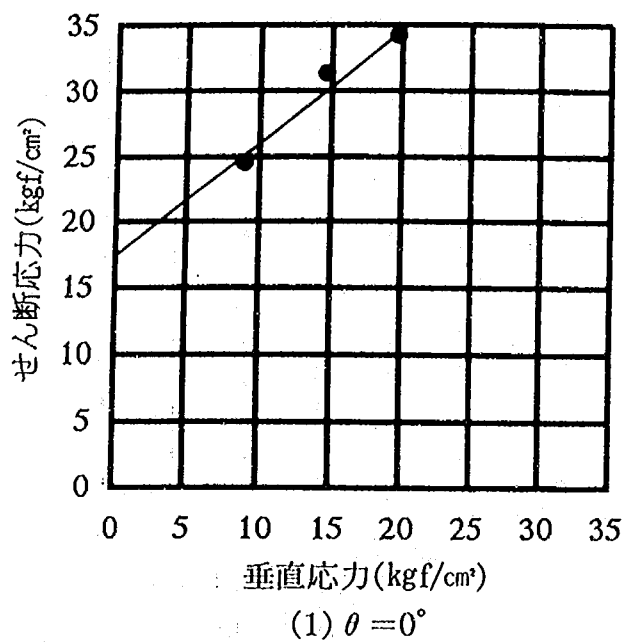


図-5.2.10 破壊荷重モデルから求めた破壊時応力 (ケース2, その1)

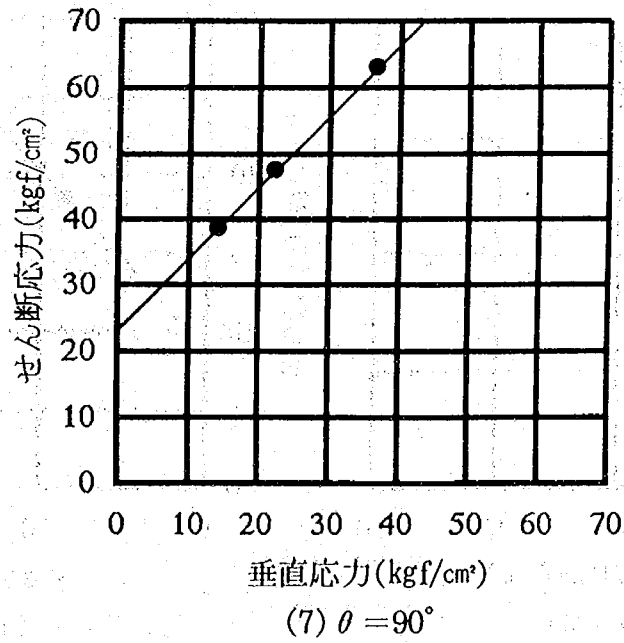
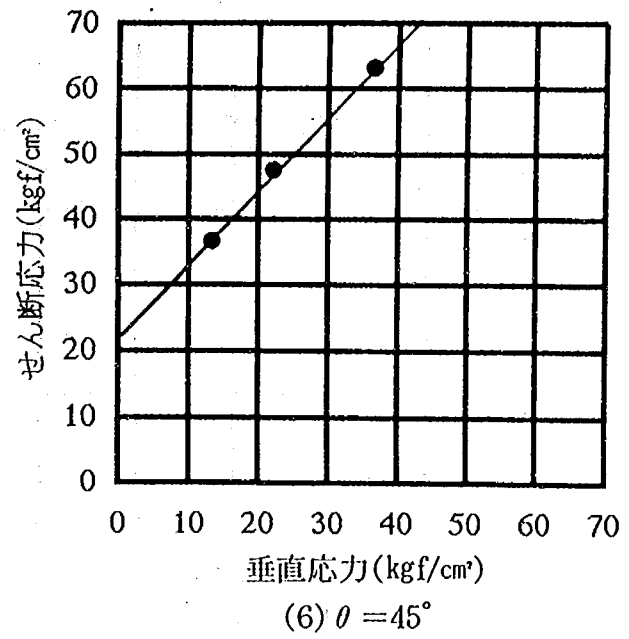
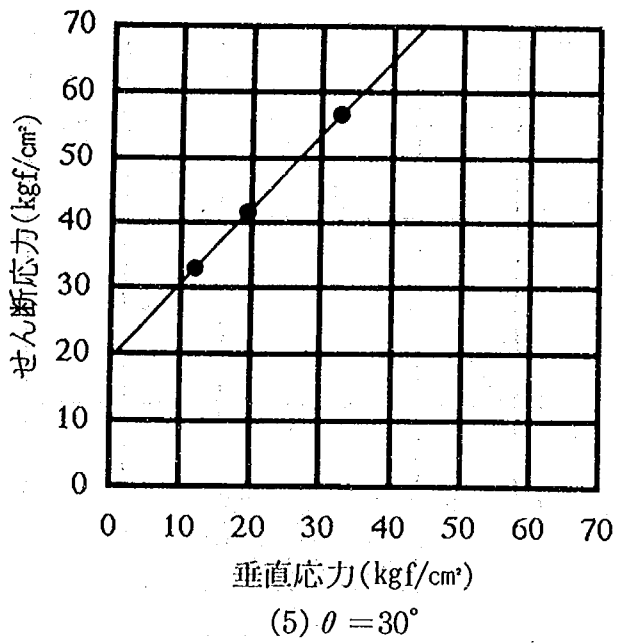


図5.2.10 破壊荷重モデルから求めた破壊時応力 (ケース2, その2)

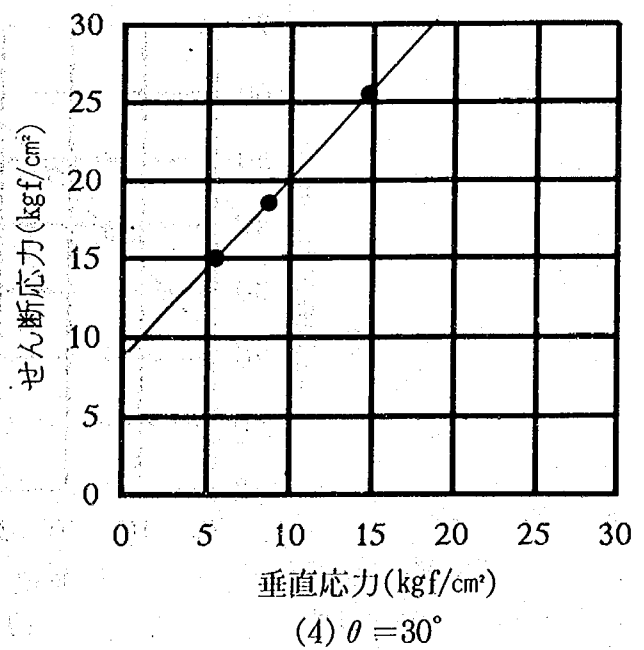
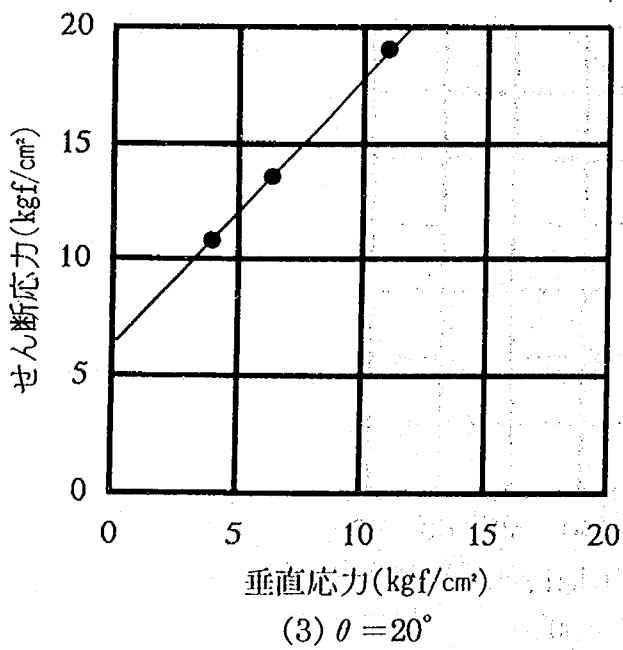
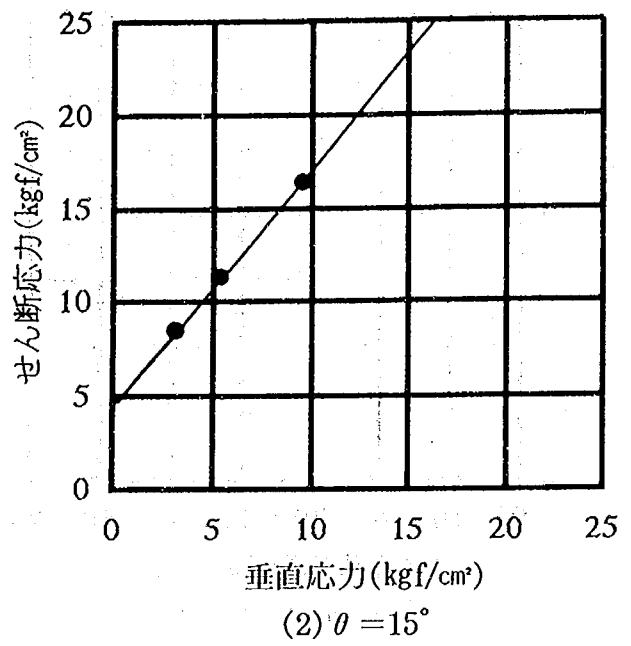
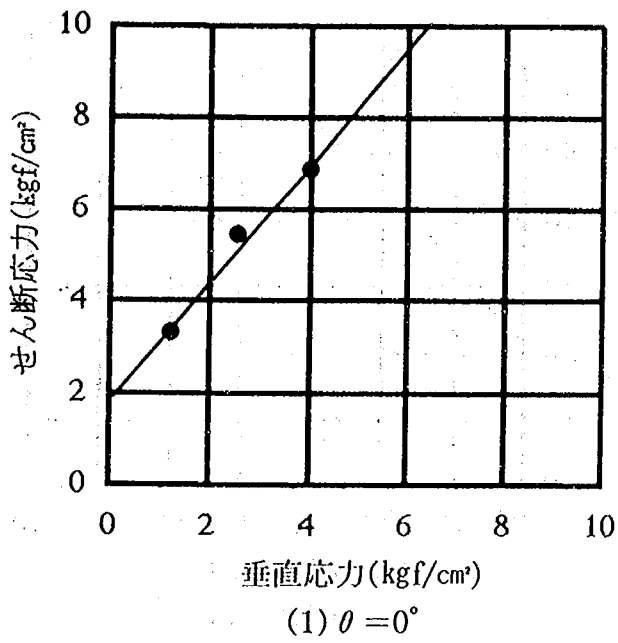


図-5.2.11 破壊荷重モデルから求めた破壊時応力 (ケース3, その1)

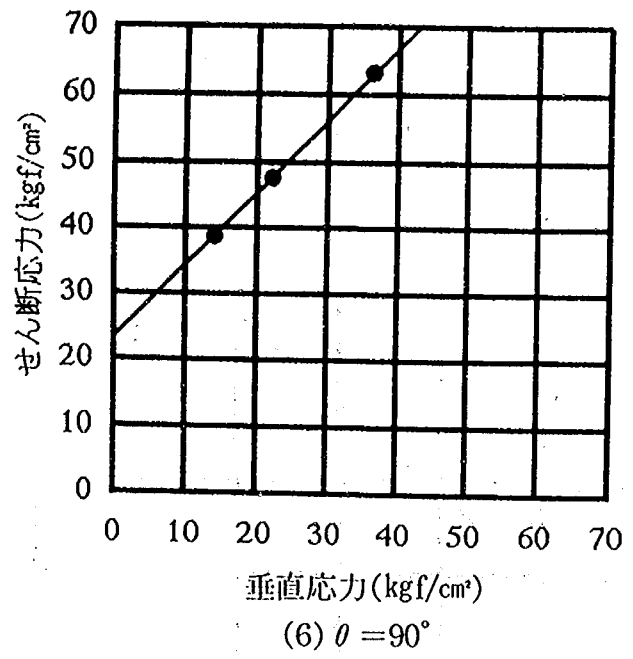
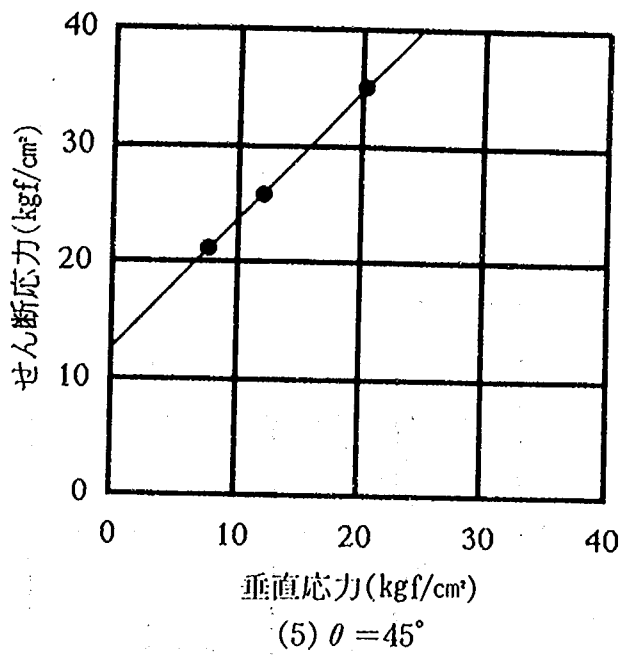


図-5.2.11 破壊荷重モデルから求めた破壊時応力 (ケース3, その2)

(2) 試験誤差によるバラツキの可能性

次に、上述した想定せん断面における破壊規準線（図-5.2.9～図-5.2.11）と実際の破壊荷重から求めた破壊時応力の関係を図-5.2.12～図-5.2.14に示す。図によれば、実際の破壊時応力は大きくばらついており、今回のせん断試験結果のバラツキの主要な原因は試験誤差によるものと考えられる。

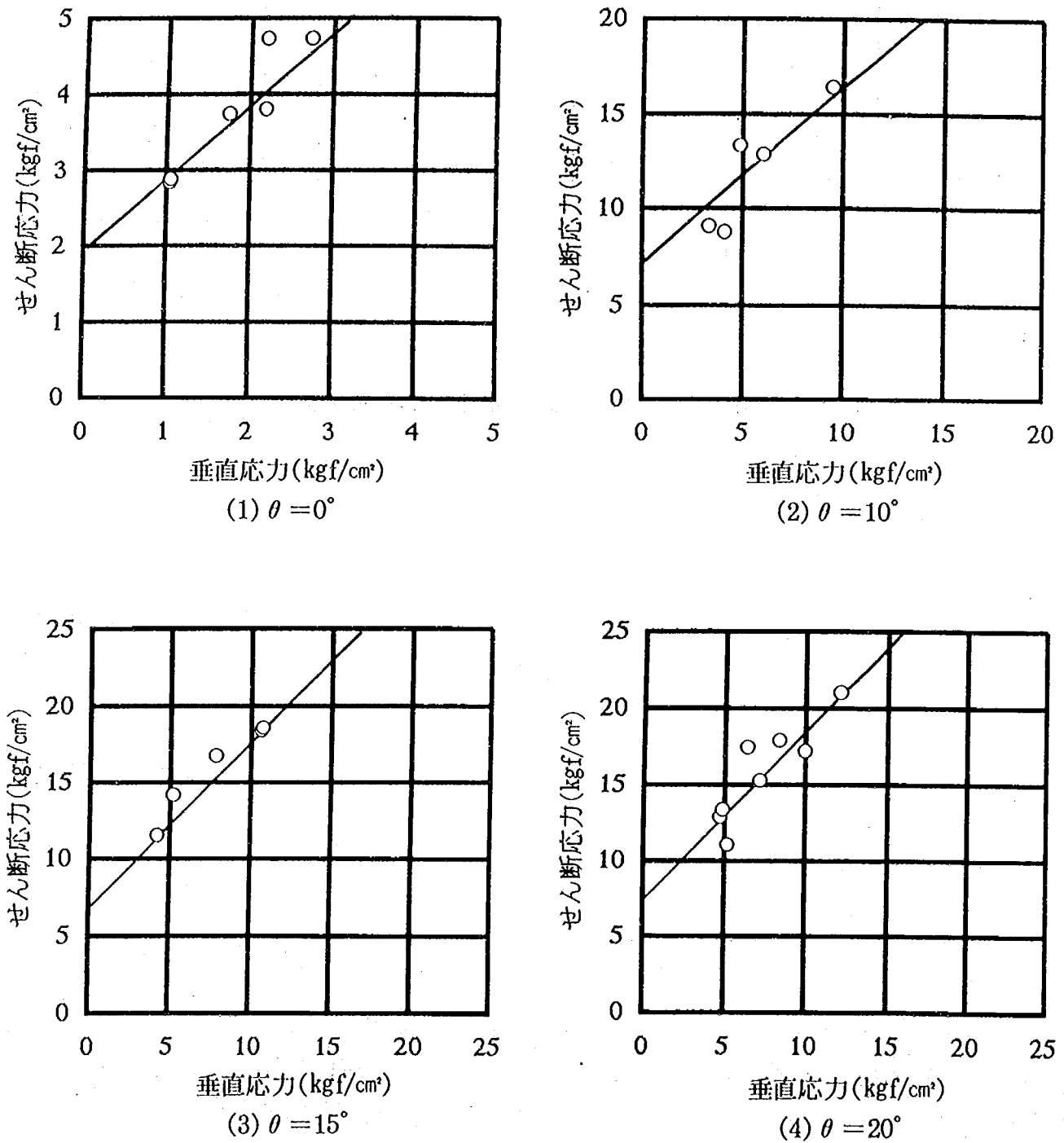


図-5.2.12 破壊荷重モデルから求めた破壊規準線と実際の破壊時応力の関係（ケース1，その1）

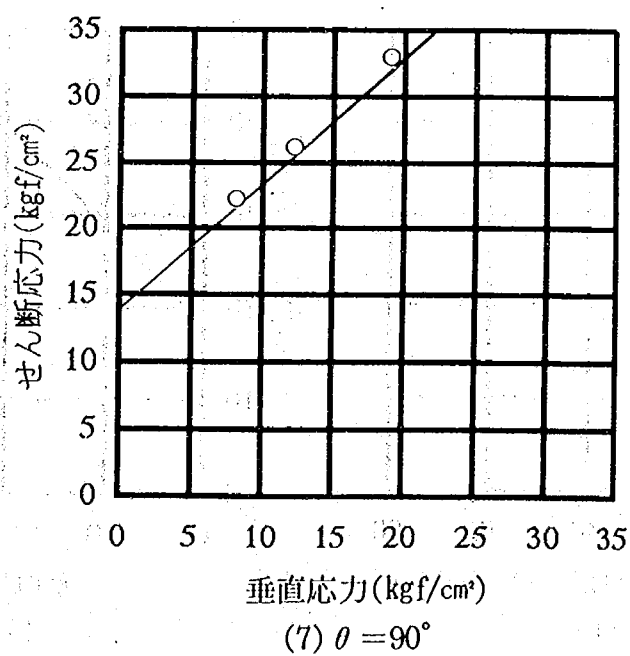
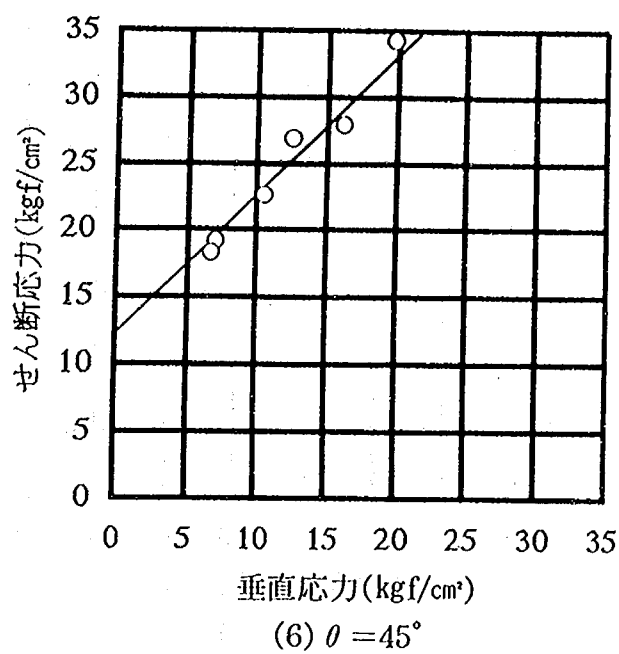
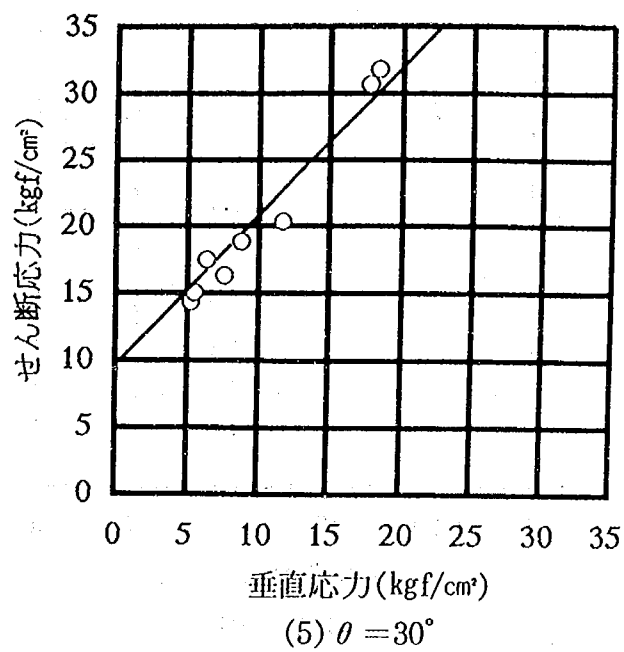


図-5.2.12 破壊荷重モデルから求めた破壊規準線と実際の破壊時応力の関係 (ケース1, その2)

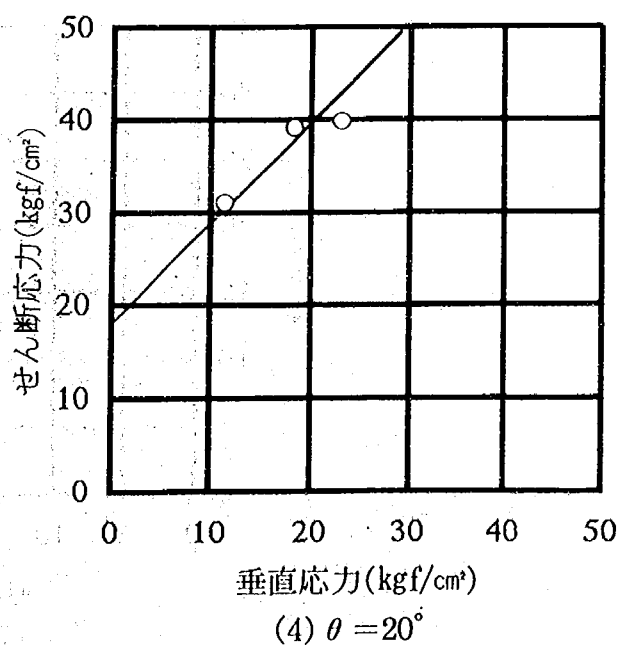
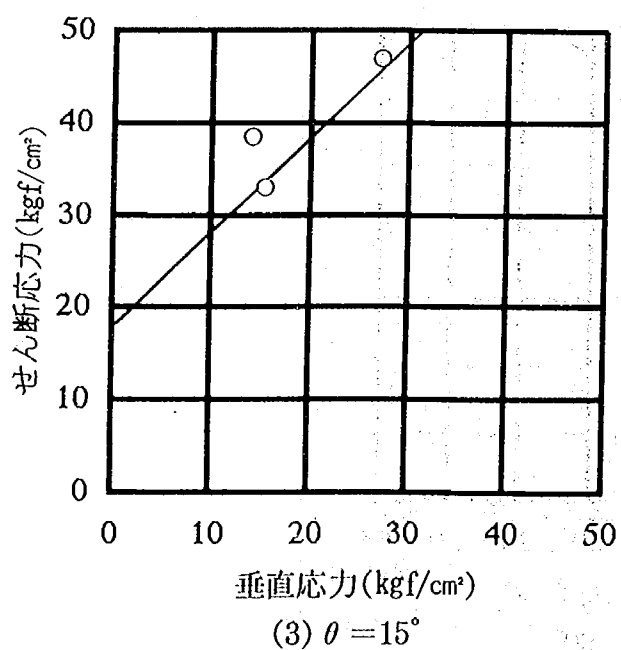
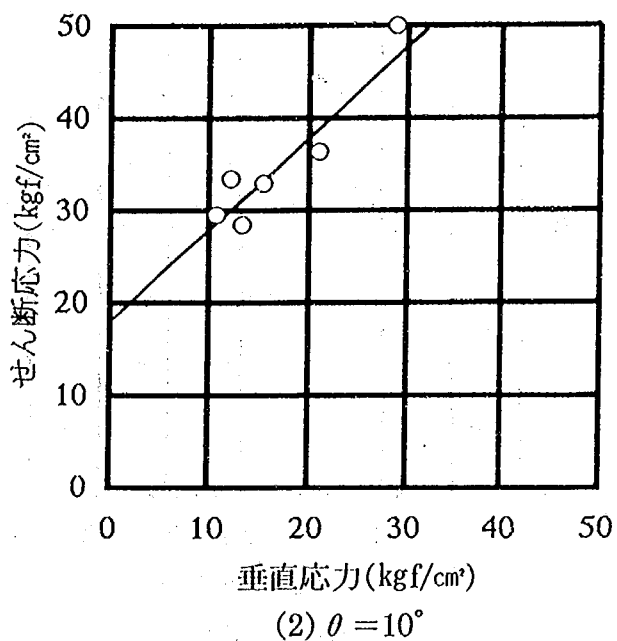
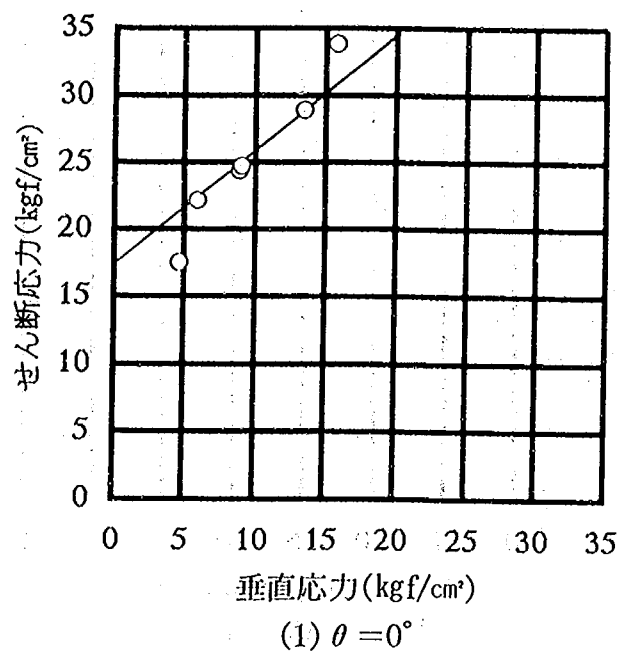


図-5.2.13 破壊荷重モデルから求めた破壊規準線と実際の破壊時応力の関係 (ケース2, その1)

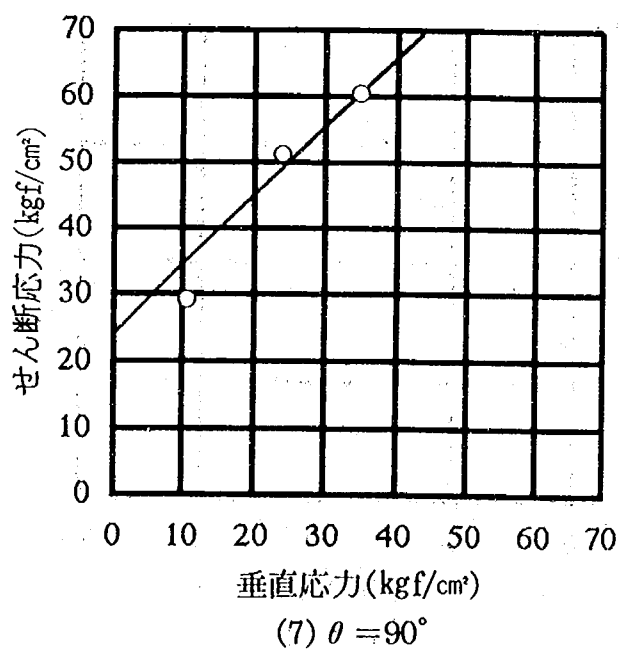
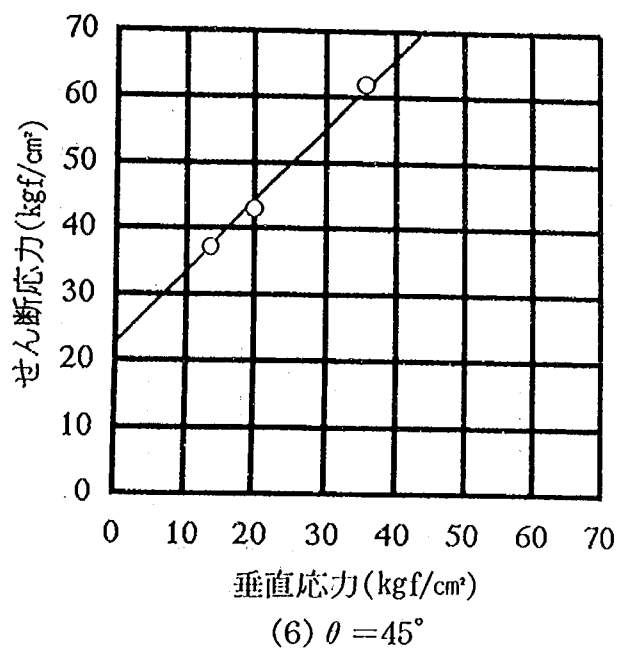
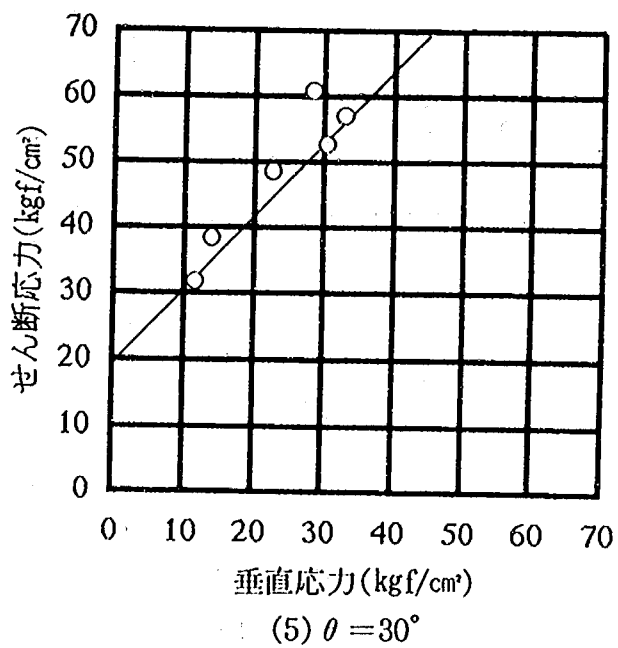
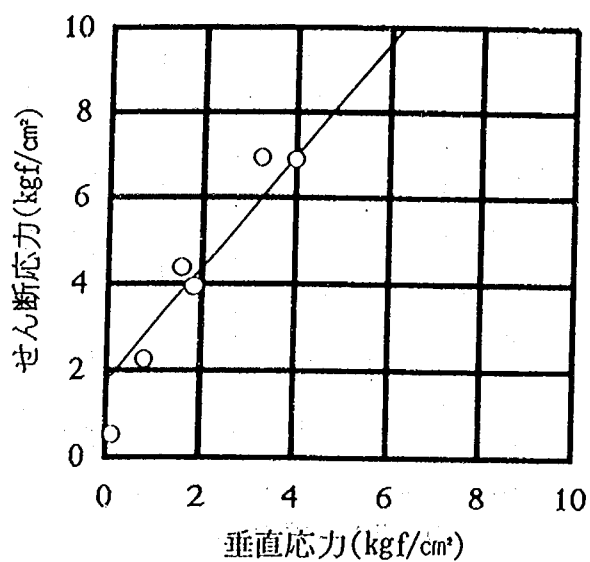
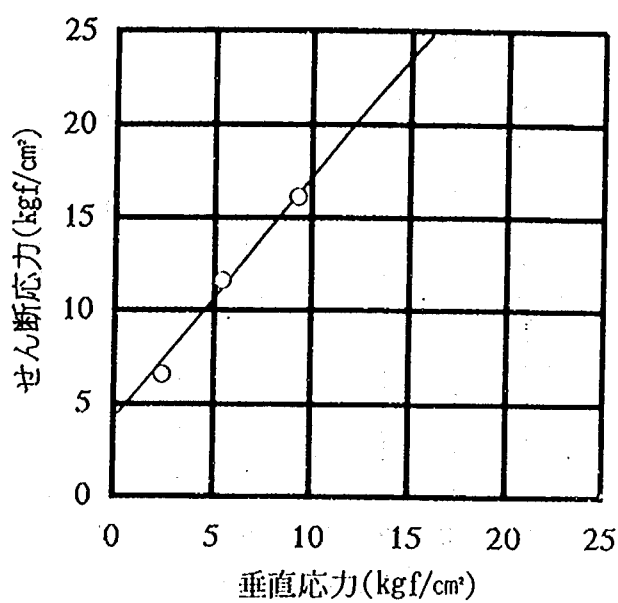


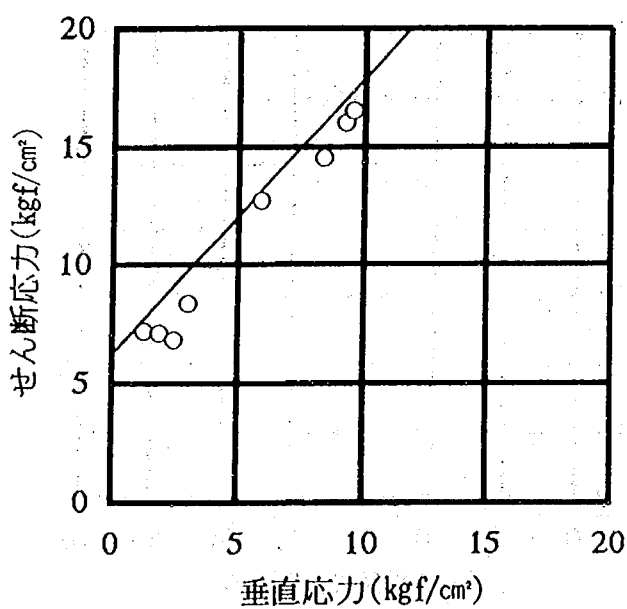
図-5.2.13 破壊荷重モデルから求めた破壊規準線と実際の破壊時応力の関係 (ケース2, その2)



(1) $\theta = 0^\circ$



(2) $\theta = 15^\circ$



(3) $\theta = 20^\circ$

図-5.2.14 破壊荷重モデルから求めた破壊規準線と実際の破壊時応力の関係 (ケース3, その1)

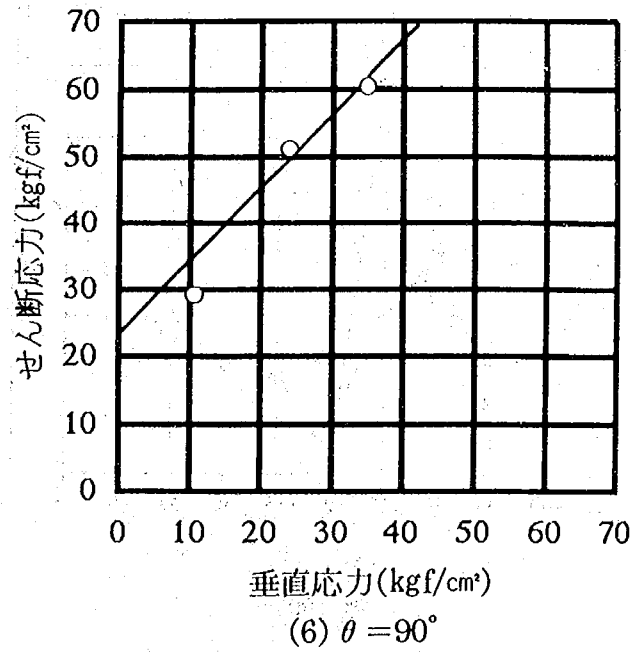
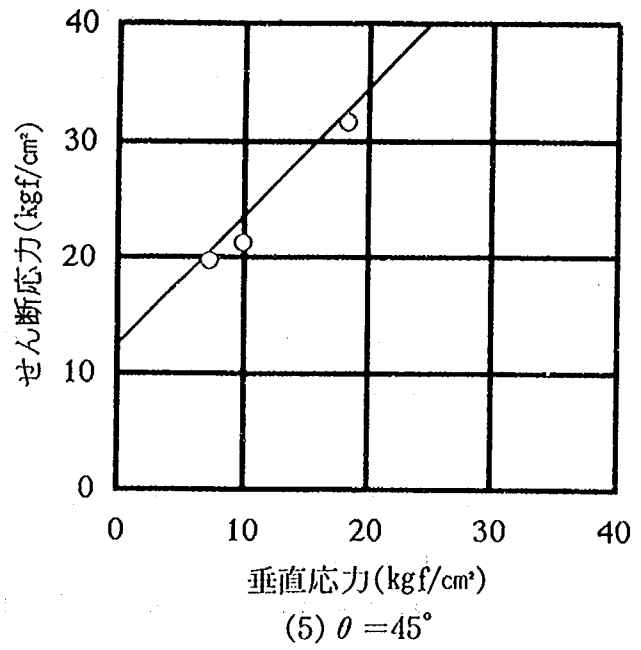
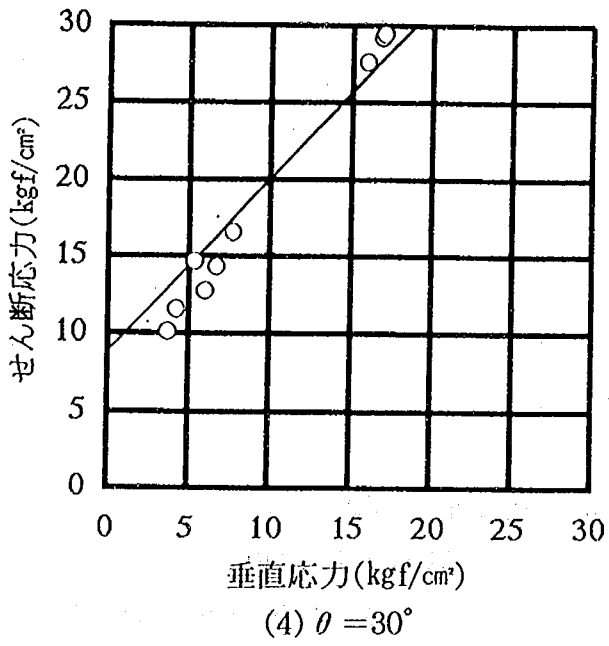


図-5.2.14 破壊荷重モデルから求めた破壊規準線と実際の破壊時応力の関係 (ケース 3, その 2)

5.3 岩片のせん断強度と節理面のせん断強度が岩盤のせん断強度に及ぼす影響

(1) 岩片のせん断強度の影響

ケース1とケース3では節理面のせん断強度がほぼ同一の値を有するため、両者を比較することによって岩片の強度が岩盤のせん断強度に及ぼす影響を知ることができる。各せん断強度に対して、節理の角度 θ と岩盤供試体の破壊荷重 P の関係を比較した結果を図-5.3.1に示す。図によれば、以下のことが結論づけられる。

①流れ目 ($\theta \geq 0^\circ$) の場合

節理の角度 θ が 45° よりも小さい場合、ケース1とケース3の破壊荷重はほぼ同一の値を示し、岩片の強度の影響は比較的小さい。一方、節理の角度 θ が 45° よりも大きい場合、ケース1とケース3の破壊荷重は異なる値を示し、岩片の強度の影響が大きく現れている。

②さし目 ($\theta \leq 0^\circ$) の場合

節理面の角度 θ が 0° に近い場合、節理面に沿ったせん断破壊が生じ、岩片の強度の影響は小さいが、このような場合を除くと、ケース1とケース3の破壊荷重は異なる値を示す。この範囲では、想定せん断面に沿ったせん断破壊または節理間の岩片の曲げ破壊が生じており、このため、岩片の強度の影響が現れているものと考えられる。

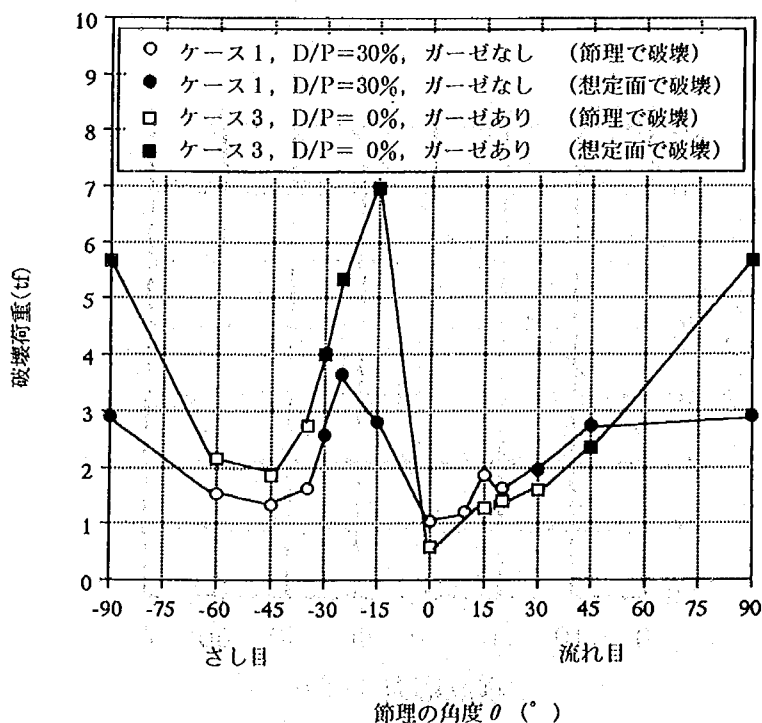


図-5.3.1 岩盤供試体の破壊荷重の比較 (ケース1とケース3, $\beta = 25^\circ$)

(2) 節理面のせん断強度の影響

ケース2とケース3では、岩片の強度は同一であるが、節理面のせん断強度が異なるため、両者を比較することによって節理面のせん断強度が岩盤のせん断強度に及ぼす影響を知ることができる。各せん断角

度に対して、節理の角度 θ と岩盤供試体の破壊荷重 P の関係を比較した結果を図-5.3.2に示す。図によれば、以下のことがいえる。

①流れ目 ($\theta \geq 0^\circ$) の場合

節理の角度 θ が 90° の場合を除くと、ケース 2 とケース 3 の破壊荷重は大きく異なり、節理面のせん断強度の影響が大きい。一方、節理の角度 θ が 90° の場合、ケース 2 とケース 3 の破壊荷重はほぼ同一の値を示し、節理面のせん断強度の影響は小さい。

②さし目 ($\theta \leq 0^\circ$) の場合

節理面の角度 θ が 0° に近い場合、節理面に沿ったせん断破壊が生じ、節理面のせん断強度の影響が大きく現れている。また、節理面の角度 θ の絶対値がせん断角度 β にほぼ等しくなると、岩片が柱となって抵抗するため、節理面のせん断強度の影響は小さくなっている。また、節理面の角度 θ の絶対値が十分に大きくなると、想定せん断面に沿ったせん断破壊が生じるため、節理面の強度の影響は小さくなっている。ここまでの関係は「(1) 岩片のせん断強度の影響」で述べた結果と一致しているが、節理の角度 θ の絶対値がせん断角度 β よりやや大きくなって節理間の岩片が曲げ破壊を生じる範囲では、岩片の強度が同一であるにもかかわらず、節理面のせん断強度が大きいケース 2 において破壊荷重が大きくなっており、「(1) 岩片のせん断強度の影響」で述べた内容とは異なる結果となっている。これは、ケース 2 の場合、節理面のせん断強度がかなり大きいことから、節理に沿ったずれが生じにくく、これが岩片に曲げ破壊を生じさせる荷重を増加させたものと考えられる。

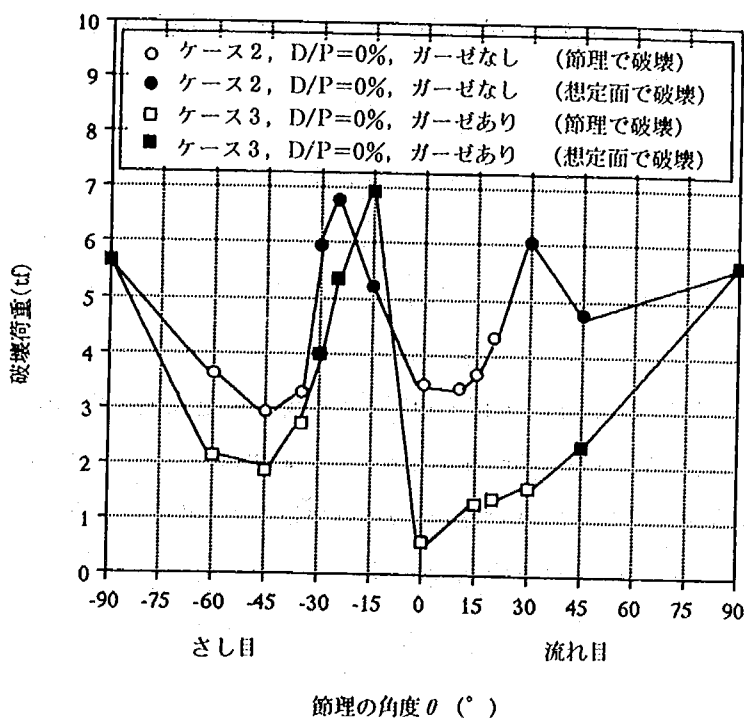


図-5.3.2 岩盤供試体の破壊荷重の比較 (ケース 2 とケース 3, $\beta = 25^\circ$)

(3) 岩片と節理面の純せん断強度の比が岩盤のせん断強度に及ぼす影響

今回実施したせん断試験では、岩片と節理面の内部摩擦係数はほぼ同程度であるので、これらの試験結果を整理することによって岩片と節理面の純せん断強度の比が岩盤のせん断強度にどのような影響を及ぼすかを評価することができる。ここでは、節理面の純せん断強度と岩片の純せん断強度の比を純せん断強度比 α として、純せん断強度比と岩盤のせん断強度の関係について検討を加えた。なお、ケース1～ケース3の各岩盤供試体の純せん断強度比 α を表-5.3.1に示す。

表-5.3.1 節理面と岩片の純せん断強度比 α

種別	ケース1	ケース2	ケース3
節理面の純せん断強度 (kgf/cm ²)	1.9	13.4	1.0
岩片の純せん断強度 (kgf/cm ²)	13.9	19.9	19.9
純せん断強度比 α (%)	14	67	5

種々の節理の角度 θ に対する岩盤の純せん断強度と内部摩擦係数(表-4.2.4参照)を岩片の純せん断強度 τ_o^* 、内部摩擦係数 f^* で除して正規化した結果を図-5.3.3および図-5.3.4に示す。図-5.3.3によれば、さし目の場合、岩片が柱となって作用したり、岩片が曲げ破壊を生じたり、その挙動は極めて複雑であるが、流れ目の場合、節理の角度 θ の増加とともに τ_o/τ_o^* の値は単調に増加している。いま、流れ目で岩盤の純せん断強度 τ_o が岩片の純せん断強度 τ_o^* と等しくなる($\tau_o/\tau_o^*=100\%$)ときの節理の角度をBとすると、Bの値はケース2($\alpha=67\%$)、ケース1($\alpha=14\%$)、ケース3($\alpha=5\%$)の順に大きくなり、純せん断強度比 α が小さいほど岩盤の純せん断強度 τ_o に影響を及ぼす節理の角度 θ の範囲が大きいことがわかる。なお、この関係を節理の角度 θ と τ_o/τ_o^* の関係式として表わすと次のように近似できる。

$$\tau_o/\tau_o^* \begin{cases} = \alpha + A \times \theta & (0^\circ \leq \theta \leq B^\circ) \\ = 100\% & (B^\circ \leq \theta \leq 90^\circ) \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

上式は物理的な意味を持つ式ではないが、節理の角度 θ と岩盤の純せん断強度の関係を数学的によく表わしていると考えられる。なお、A、Bの値を回帰すると、その値は図-5.3.5のようになる。したがって、節理面と岩片の純せん断強度比 α が既知であれば、任意の節理の角度 θ に対する岩盤の純せん断強度 τ_o が図-5.3.5および式(2)より近似的に求められることになる。

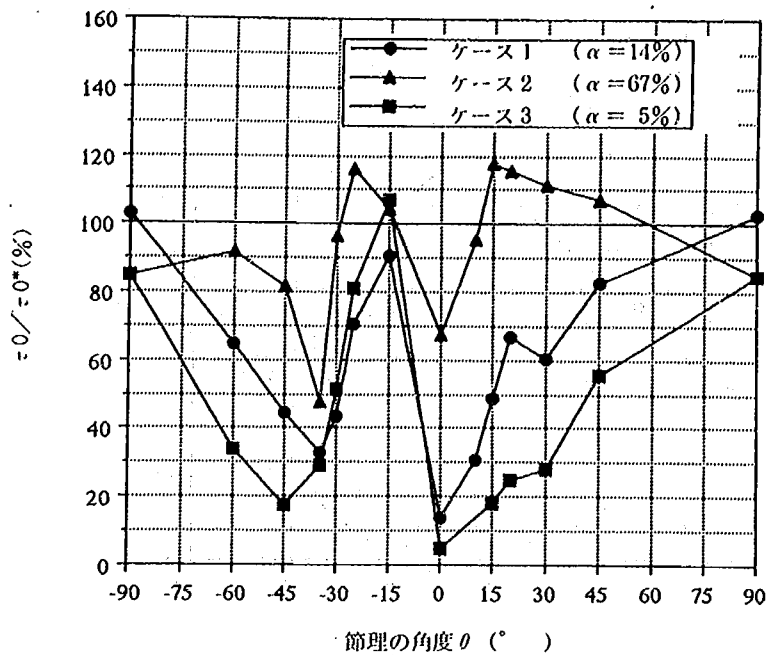


図-5.3.3 節理の角度 θ と純せん断強度比 τ_0/τ_0^* の関係

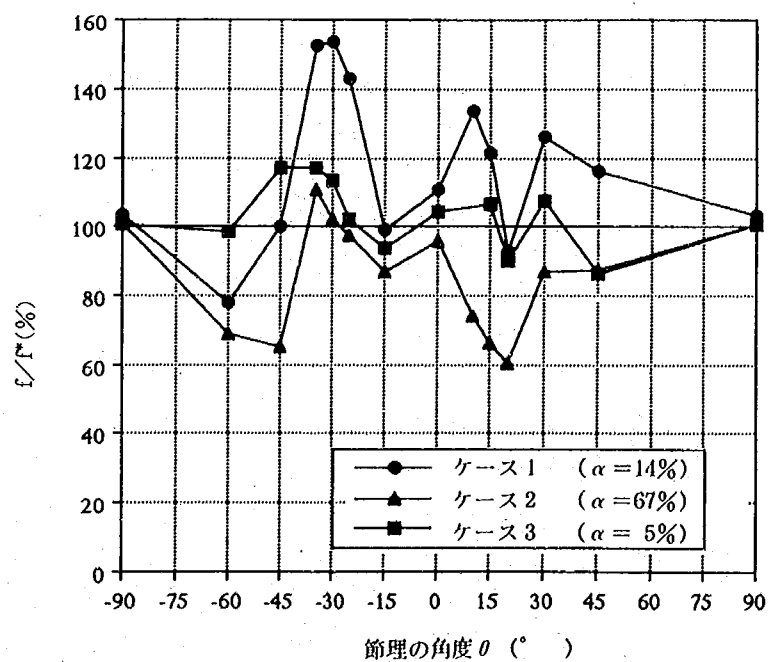


図-5.3.4 節理の角度 θ と内部摩擦係数の比 f/f^* の関係

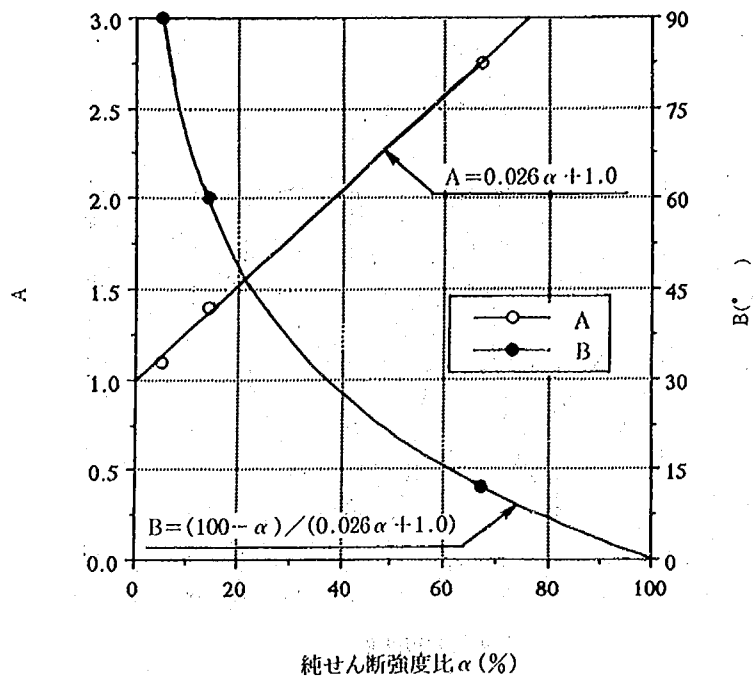


図-5.3.5 純せん断強度比 α と係数 A , B の関係

5.4. 2次元有限要素法による解析結果とせん断試験結果の比較

せん断試験時の破壊特性をより詳細に把握するため、表-5.4.1に示す物性値を使用して、弾性論に基づいた2次元有限要素法による解析を実施した。安全率の計算に際しては、せん断試験から得られた破壊規準（表-5.4.2参照）を用いた。

表-5.4.1 解析に用いた物性値

種別	弾性係数(kgf/cm ²)	ポアソン比
石膏	70,000	0.2
石膏+珪藻土	30,000	0.2
せん断用治具	2,100,000	0.3

表-5.4.2 破壊規準一覧

種別	破壊規準		摘要
	一般部	節理	
ケース1	$\tau = 13.9 + 0.95 \sigma$	$\tau = 1.9 + 1.05 \sigma$	D/P=30%
ケース2	$\tau = 19.9 + 1.29 \sigma$	$\tau = 13.4 + 1.24 \sigma$	D/P=0%, ガーゼなし
ケース3	$\tau = 19.9 + 1.29 \sigma$	$\tau = 1.0 + 1.34 \sigma$	D/P=0%, ガーゼあり

(単位: kgf/cm²)

(1) 想定せん断面近傍での応力分布

ケース1についてせん断角度 β を20°, 25° および30° とした場合の供試体内の主応力図および変位図を図-5.4.1～図-5.4.3に示す。これらの図では、想定せん断面近傍での応力の流れは良好で、主応力の大きさおよび方向はほぼ一定であり、また顕著な応力集中は認められない。解析結果に基づいて、想定せん断面における想定せん断面方向と節理方向について破壊時の垂直応力分布およびせん断応力分布をまとめた一例を図-5.4.4に示す。全体の傾向として、想定せん断面方向の発生応力は中央でやや小さく、両端で大きくなっており、なべ底形を示している。垂直応力は概ね圧縮応力であるが、せん断角度 β が小さい場合には中央部で引張が発生している。

(2) 節理の角度とせん断に対する安全率の関係

せん断に対する点安全率 n は式(3)によって求められる。

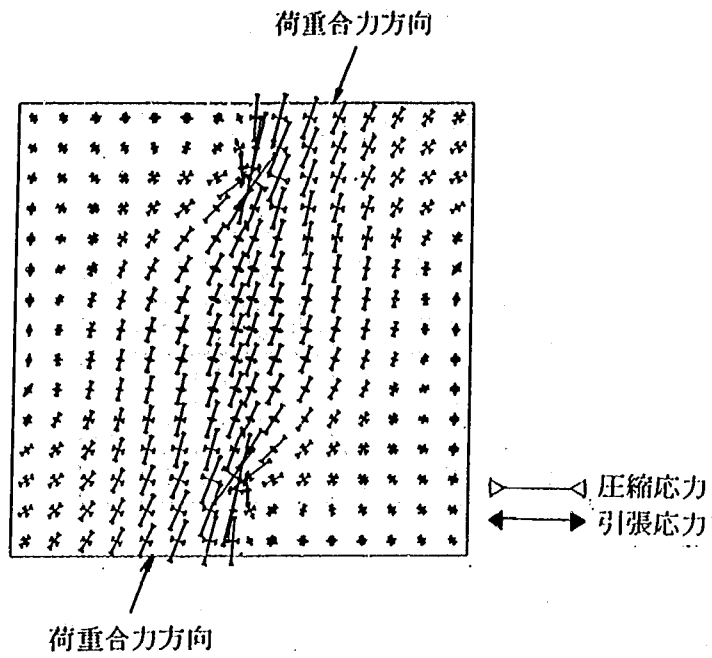
$$n = (\tau_0 + f\sigma) / \tau \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 τ_0 : 純せん断強度

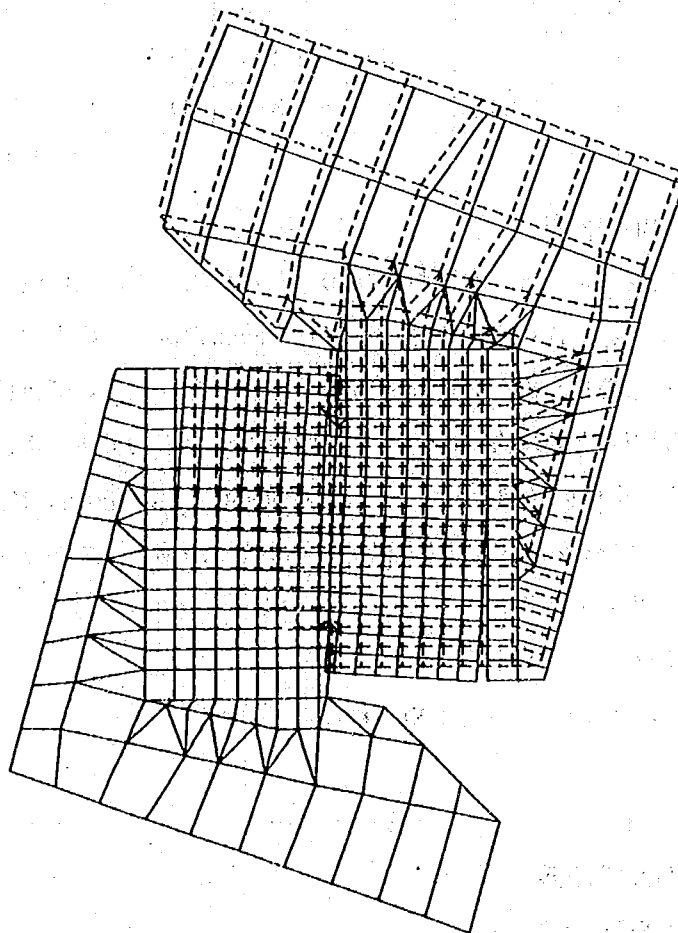
f : 内部摩擦係数

σ : 垂直応力

τ : せん断応力

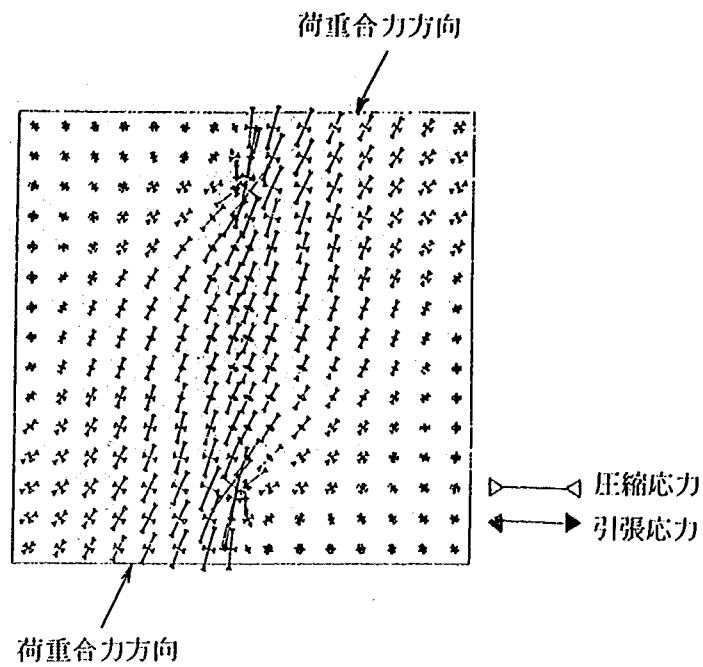


(1) 主応力分布図

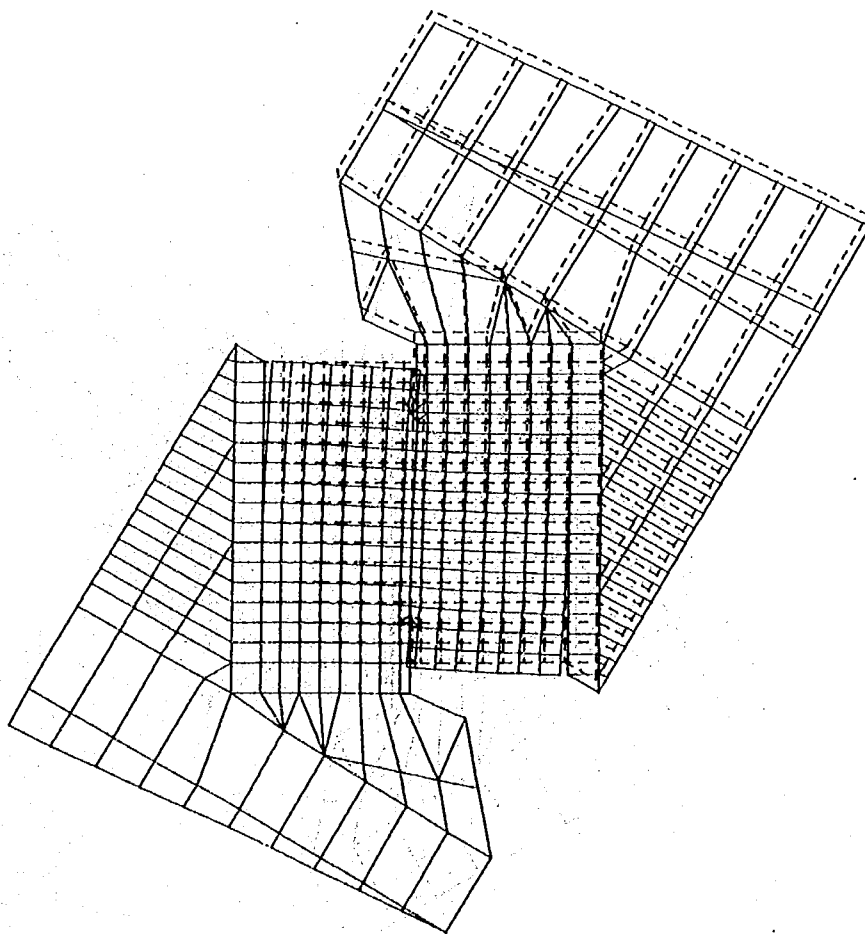


(2) 変位図

図-5.4.1 せん断試験時の主応力分布図および変位図 (ケース1, せん断角度 $\beta = 20^\circ$)

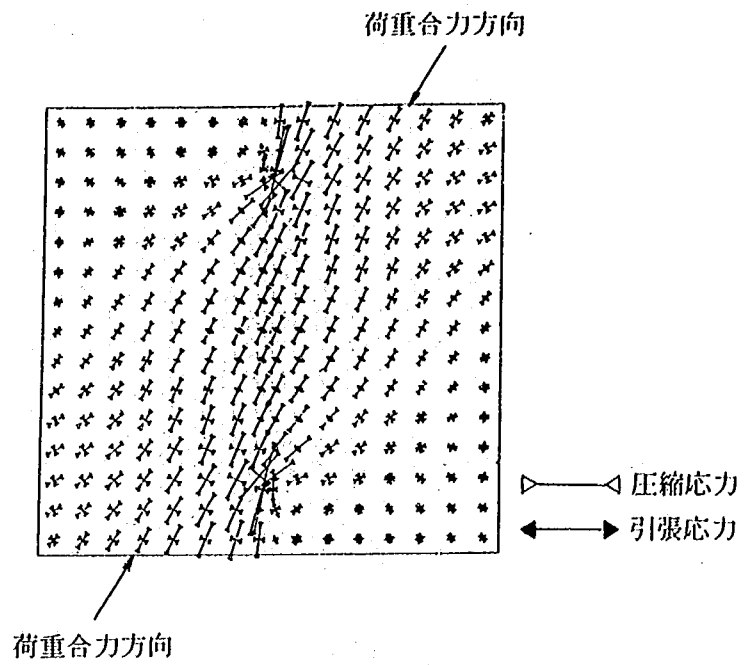


(1) 主応力分布図

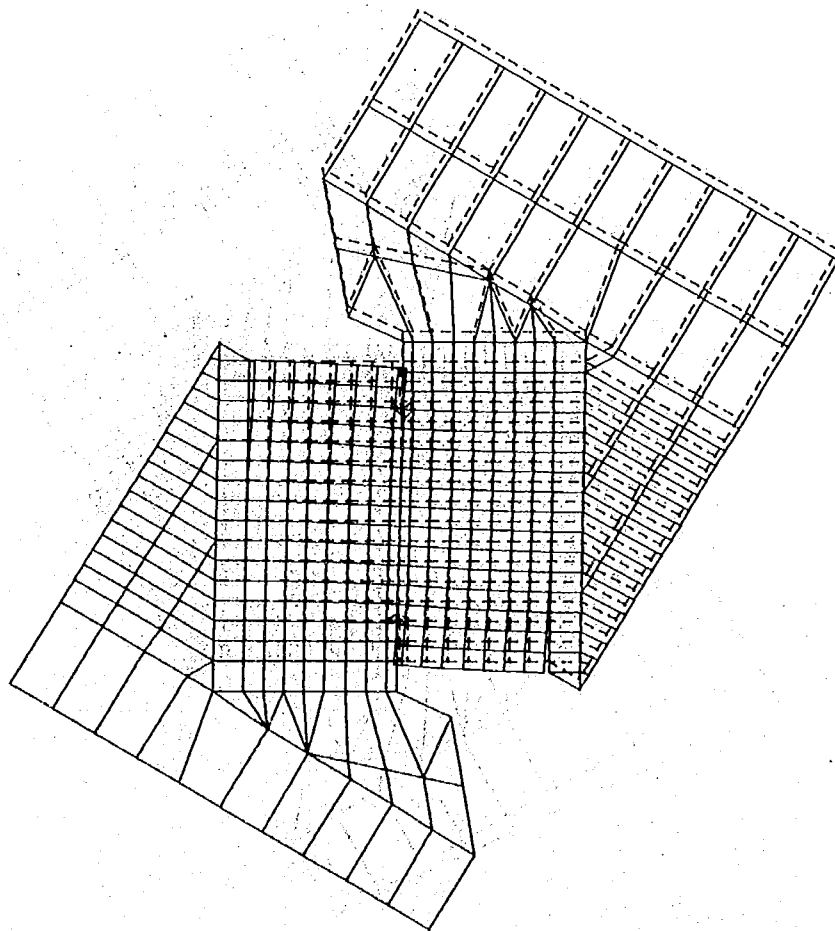


(2) 変位図

図-5.4.2 せん断試験時の主応力分布図および変位図 (ケース1, せん断角度 $\beta = 25^\circ$)



(1) 主応力分布図



(2) 変位図

図-5.4.3 せん断試験時の主応力分布図および変位図 (ケース1, せん断角度 $\beta = 30^\circ$)

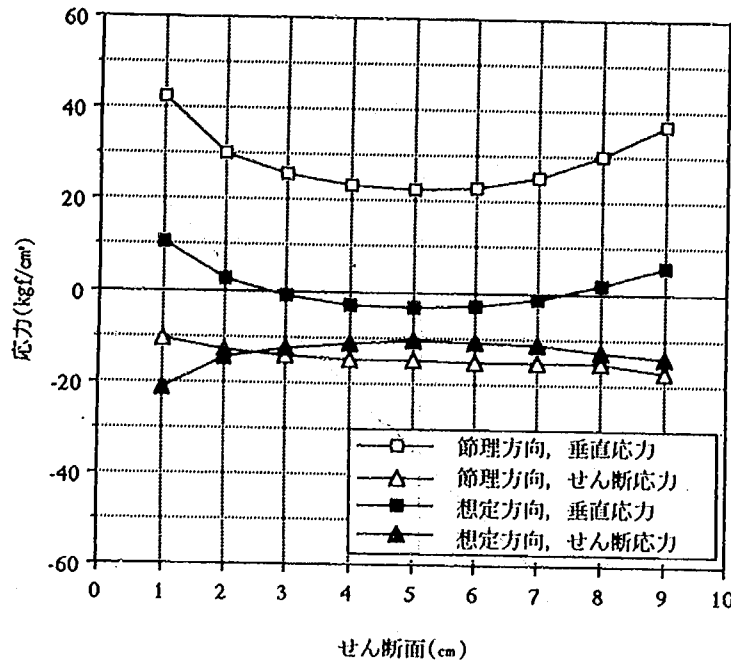


図-5.4.4 想定せん断面における応力分布

(ケース1, $D/P=30\%$, 節理の角度 $\theta=45^\circ$, せん断角度 $\beta=20^\circ$)

想定せん断面での節理方向のせん断に対する点安全率を n_1 , 想定せん断面方向のせん断に対する点安全率を n_2 として, 解析結果から破壊時の荷重に対する点安全率を節理方向と想定せん断面方向について求めた。ここで, 垂直応力 σ が引張応力となる場合の点安全率については, 図-5.4.5に示すように破壊規準をそのまま引張領域に延長して計算を行った。点安全率分布の一例を図-5.4.6に示す。ここで, 点安全率 n_1 , n_2 をせん断面全体で単純平均したものを N_1 , N_2 とし, 節理の角度 θ と N_1 , N_2 の関係を求めたものが図-5.4.7~図-5.4.9である。 N_1 , N_2 は破壊時の荷重に対するせん断面全体の安全率を表わしている。これらの図より, 次の傾向が認められる。

- ①流れ目の $0^\circ < \theta < 15^\circ \sim 30^\circ$ では $N_1 \leq N_2$ となっており, 節理方向の安全率 N_1 は概ね1.0である。したがって破壊は節理に沿って生じると考えられ, 実際のせん断試験でも破壊は節理に沿って発生している。
- ②流れ目の $\theta > 15^\circ \sim 30^\circ$ では $N_1 \geq N_2$ となっており, 想定せん断面方向の安全率 N_2 は概ね1.0である。したがって破壊は想定せん断面に沿って生じると考えられ, 実際のせん断試験でも破壊は想定せん断面付近で発生している。
- ③さし目の $-30^\circ \leq \theta \leq -15^\circ$ では, 節理面のせん断応力が大きく, また垂直応力が引張となることから, 節理方向の安全率 N_1 は極端に小さくなっている。一方, 想定せん断面方向の安全率 N_2 は概ね1.0である。この範囲では, 節理沿いの引張破壊が全体の破壊に至らず, 岩片が柱となって荷重に抵抗する結果, 想定せん断面方向の安全率が1.0となって初めて全体の破壊が発生するものと考えられる。
- ④さし目の $-60^\circ \leq \theta \leq -35^\circ$ では, 節理方向の安全率 N_1 は1.0以下で, 想定せん断面方向の安全率 N_2 は1.0以上である。実験では, 節理間の岩片が曲げ破壊を生じており, せん断に対する安全率では破壊の状態を厳密に表現できない範囲と考えられる。

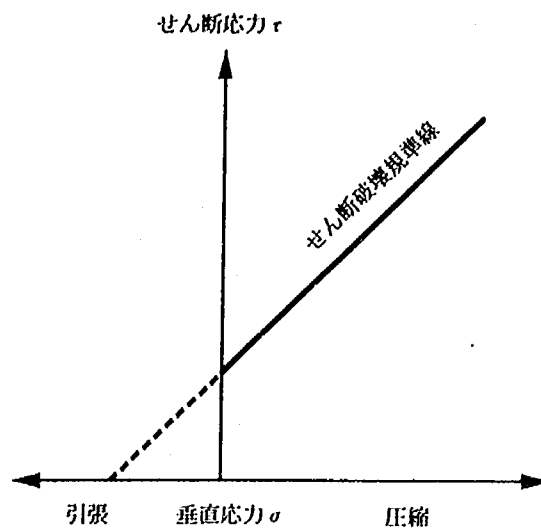


図-5.4.5 垂直応力が引張応力の場合のせん断破壊規準線の取扱い

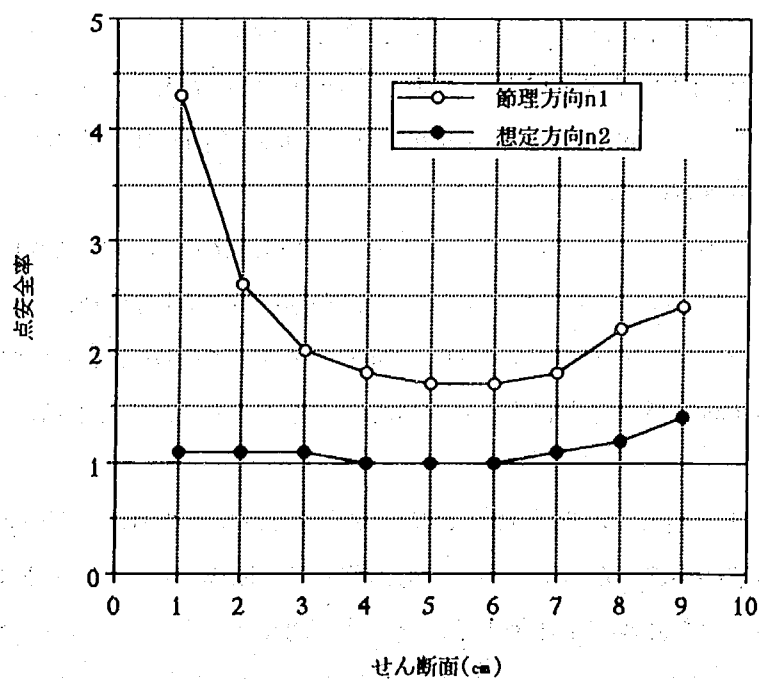


図-5.4.6 想定せん断面における点安全率分布

(ケース1, $D/P=30\%$, 節理の角度 $\theta=45^\circ$, せん断角度 $\beta=20^\circ$)

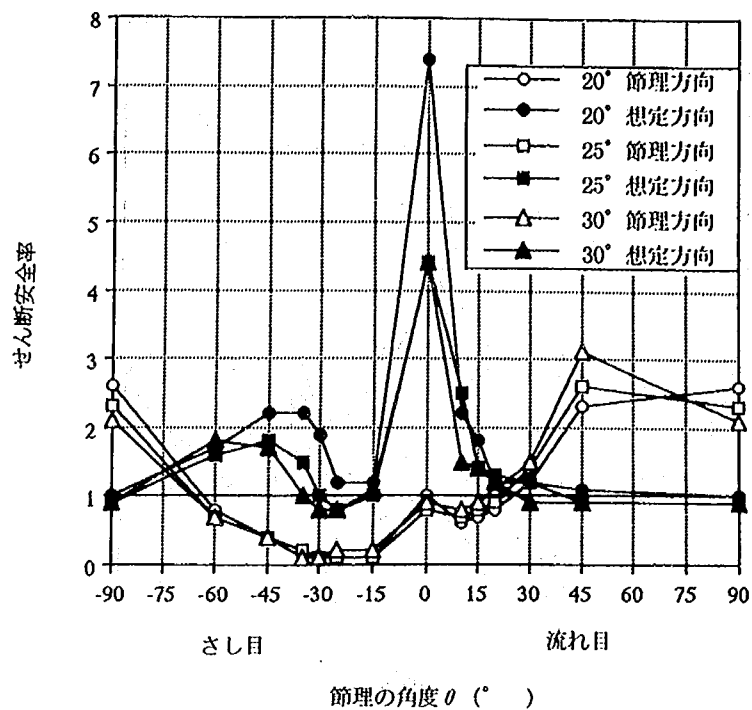


図-5.4.7 破壊荷重におけるせん断安全率 (ケース1, D/P=30%, ガーゼなし)

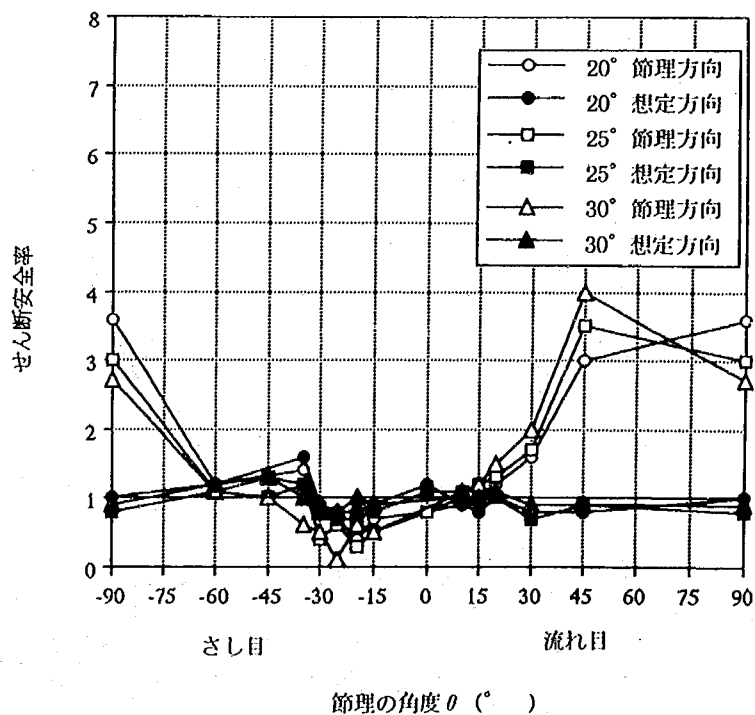


図-5.4.8 破壊荷重におけるせん断安全率 (ケース2, D/P=0%, ガーゼなし)

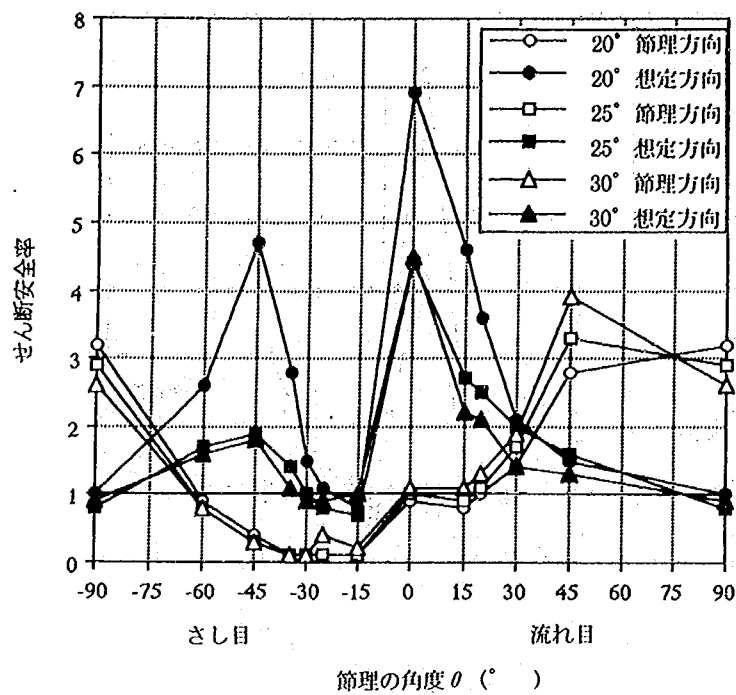


図-5.4.9 破壊荷重におけるせん断安全率 (ケース3, $D/P=0\%$, ガーゼあり)

6 ま と め

今回の板状節理を有する岩盤を模擬した模型せん断試験結果から得られた知見をとりまとめると以下のとおりである。

- (1) 一般に、流れ目、さし目とも、節理の角度の絶対値の増加とともに、岩盤のせん断強度に及ぼす節理の強度の影響は減少し、岩片の強度の影響が大きくなる。ただし、荷重の作用方向と節理の方向とが一致する場合（今回の試験ではさし目の $-25^{\circ} \leq \theta \leq -15^{\circ}$ ）は節理間の岩片が柱となって抵抗し、高いせん断強度を有する特殊な場合となる。
- (2) 流れ目では、岩片の純せん断強度に対する節理面の純せん断強度の比が小さいほど、岩盤の純せん断強度に影響を及ぼす節理の角度の範囲も大きくなる。
- (3) 流れ目について、岩片の純せん断強度に対する節理面の純せん断強度の比 α が岩盤の純せん断強度 τ_0 に与える影響を整理すると、次に示すような関係が得られた。

$$\tau_0 / \tau_0^* \begin{cases} = \alpha + A \times \theta & (0^{\circ} \leq \theta \leq B^{\circ}) \\ = 100\% & (B^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ}) \end{cases}$$

$$A = 0.026 \times \alpha + 1.0$$

$$B = (100 - \alpha) / A = (100 - \alpha) / (0.026 \times \alpha + 1.0)$$

ここで、 τ_0 ：岩盤の純せん断強度

τ_0^* ：岩片の純せん断強度

α ：岩片の純せん断強度に対する節理の純せん断強度の比（％）

θ ：節理の角度

- (4) 節理の角度の変化に伴うせん断面の破壊形態の変化は弾性論に基づく数値解析から求めた安全率の計算結果と概ね一致した。

今回の試験結果から、卓越した板状の節理の角度および強度が岩盤の強度に及ぼす影響についてその特徴を概略把握することができた。今後は、節理の状態および形状について実際の岩盤により近い条件で研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) 林正夫, 藤原義一: 積層体のせん断抵抗とダイレイタンスの異方性およびその機構, 第3回岩盤力学シンポジウム, pp.17-21, 1964.
- 2) 佐武正雄, 田野久貴: 亀裂の強度に及ぼす影響について, 第4回岩盤力学シンポジウム, pp.37-41, 1965.
- 3) 永山功, 片平博: 板状節理を含んだ岩盤模型のせん断試験, 土木技術資料, Vol.31, No.4, pp.25-30, 1989.

岩盤のせん断強度に及ぼす節理の
方向および節理面のせん断強度の
影響に関する実験的研究

I S S N 0386-5878
土木研究所資料第3240号
平成 6 年 3 月(1994)

ダム構造研究室 室 長 永 山 功
研 究 員 片 平 博
部外研究員 森田 信吾

要旨

コンクリートダムの設計において、岩盤のせん断強度はダムの構造の安定性に大きな影響を及ぼす重要な要素である。本研究は、岩盤内の節理を単純化した模型に対してせん断試験を行い、岩盤内部の節理の方向(角度) および節理面のせん断強度が岩盤のせん断強度に及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。

キーワード：ダム, 節理, 岩盤, せん断強度

郵便はがき

50円切手
をはって
下さい。

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所

ダム部ダム構造研究室 行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

土研資料第3240号

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第3240号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏名

印

土木研究所資料第3240号